



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERIA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“ESTIMACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES EN TRACTORES AGRÍCOLAS USANDO TELEMETRÍA”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Santiago Josue Benavides Paspuel

DIRECTOR:

Ing. Zamir Andrés Mera Rosero Ph. D.

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0402053615		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Benavides Paspuel Santiago Josue		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	sjbenavidesp@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0991532996

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estimación de consumo de combustible y emisiones en tractores agrícolas usando telemetría.
AUTOR:	Santiago Josue Benavides Paspuel
FECHA:	13/02/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ph. D. Zamir Andrés Mera Rosero

2. 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 13 días del mes de febrero de 2026.

EL AUTOR:

Firma:

Nombre: Santiago Josue Benavides Paspuel

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Ibarra, 13 de febrero de 2026

Ph. D. Zamir Andrés Mera Rosero

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.

(f)

Ing. Zamir Andrés Mera Rosero Ph. D.

C.C.: 1003184478

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Estimación de consumo de combustible y emisiones en tractores agrícolas usando telemetría” elaborado por Santiago Josue Benavides Paspuel, previo a la obtención del título del Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

Ing. Zamir Andrés Mera Rosero Ph. D.

C.C.: 1003184478

(f):.....

Ing. Fredy Alexander Rosero Obando Ph.D.

C.C.: 1002641742

DEDICATORIA

A mi madre, Ma. Luz, por ser mi pilar fundamental, por su apoyo incondicional en cada paso que doy y por enseñarme con su ejemplo a nunca rendirme ante las adversidades.

A mi padre, Virgilio, por la sabiduría de sus consejos, aunque hoy me guía desde la eternidad, siempre será mi ejemplo de humildad.

A mi hermana Paola y su familia, por abrirme las puertas de su hogar y brindarme estabilidad durante estos años de estudio.

A mis hermanos Cristian y Andrea, junto a sus familias, por su hermandad y apoyo incondicional en todo momento, siendo la fuerza que me acompañó en este trayecto.

A Odalys, por ser mi apoyo emocional en los momentos más complejos, brindándome el aliento necesario para mantener el rumbo hacia mis metas.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por el inmenso sacrificio realizado y por proveer todo lo necesario para culminar mis estudios académicos. Gracias por su esfuerzo incansable.

A mi tutor y asesor de tesis, por su paciencia y guía a lo largo de este proceso. Agradezco profundamente su disposición para orientar este trabajo de investigación.

A Marcelo, propietario del tractor, por su generosidad y confianza al facilitar la maquinaria necesaria para este estudio.

A mi compañeros, por su buena amistad y por ser un apoyo constante durante el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Técnica del Norte, por abrirme sus puertas y brindarme las herramientas necesarias para mi crecimiento profesional.

RESUMEN EJECUTIVO

Esta investigación analiza el desempeño operativo y el impacto medioambiental de un tractor agrícola durante una jornada de trabajo bajo condiciones reales de campo, enfrentando desafíos topográficos con pendientes pronunciadas del 12%. El estudio se centra en la caracterización energética y medioambiental, permitiendo contrastar el consumo de combustible y el nivel de emisiones de dióxido de carbono en cuatro modos de operación definidos: arado, transporte, maniobra y ralentí. Para el levantamiento de datos, se implementó un sistema de telemetría integrado por un recopilador de datos CANedge2, el cual permitió la captura de variables cinemáticas, como el régimen de giro del motor, junto con la instalación de flujómetros en configuración diferencial para el monitoreo del flujo neto de combustible. El procesamiento de los datos obtenidos se realizó mediante el lenguaje de programación R, facilitando el análisis. La integración de estas herramientas permitió cumplir el objetivo general de estimar con precisión el gasto energético y la huella de carbono bajo regímenes de carga variables en condiciones de operación reales. Los resultados revelaron que la labor de arado representa la mayor fase de exigencia, con un consumo horario máximo de 19.9 L/h y una tasa de emisión de 52 kg/h de CO₂. Sin embargo, el análisis del desempeño energético demostró que bajo altas cargas el motor alcanza la zona de mayor eficiencia termodinámica, registrando un consumo específico de combustible (BSFC) mínimo de 210 g/kWh.

Palabras clave: Recopilador de datos, flujómetros de combustible, condiciones reales de operación, telemetría, eficiencia energética.

ABSTRACT

This research analyzes the operational performance and environmental impact of an agricultural tractor during a workday under real-world field conditions, facing topographical challenges with steep 12% slopes. The study focuses on energy and environmental characterization, comparing fuel consumption and carbon dioxide emissions in four defined operating modes: plowing, transport, maneuvering, and idling. Data collection employed a telemetry system integrated with a CANedge2 data collector, which captured kinematic variables such as engine speed, along with flow meters in a differential configuration to monitor net fuel flow. Data processing was performed using the R programming language, facilitating analysis. The integration of these tools enabled the achievement of the overall objective: accurately estimating energy consumption and carbon footprint under varying load regimes in real-world operating conditions. The results revealed that plowing represents the most demanding phase, with a maximum hourly fuel consumption of 19.9 L/h and a CO₂ emission rate of 52 kg/h. However, the energy performance analysis demonstrated that under high loads, the engine reaches its maximum thermodynamic efficiency, registering a minimum fuel consumption (BSFC) of 210 g/kWh.

Keywords: Data collector, fuel flow meters, real-world operating conditions, telemetry, energy efficiency.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
RESUMEN EJECUTIVO	7
ABSTRACT.....	8
ÍNDICE DE CONTENIDOS	9
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
ÍNDICE DE ECUACIONES	16
CAPÍTULO I	17
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Problema de investigación	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Alcance	18
1.4 Justificación	18
CAPÍTULO II.....	20
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 Antecedentes	20
2.2 Tipos de maquinaria agrícola.....	21
2.3 Condiciones de operaciones del motor y tren de potencia que realiza un tractor....	23
2.4 Emisiones de gases en motores diésel	24
2.5 Impacto ambiental y gases contaminantes del transporte de tractores	25
2.6 Normativa de emisiones generadas por tractores.....	26
2.6.1 Normativas Euro (Europa).....	27
2.6.2 Normativa Tier (Estados Unidos).....	27

2.7	Principios de medición de dióxido de carbono	30
2.7.1	Mediciones estáticas.	30
2.7.2	Mediciones dinámicas.....	31
2.8	Sistemas de Medición de Emisiones Portables (con sus siglas en inglés PEMS) ...	31
2.9	Sistemas de Monitoreo de Emisiones del Vehículo (con sus siglas en inglés SEMS)	32
2.10	Recopilador de datos (Datalogger)	32
2.11	Mapas de motor.....	33
CAPÍTULO III.....		34
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
3.1	Selección del vehículo	34
3.1.1	Criterio de selección	34
3.1.2	Selección de vehículo	35
3.2	Determinación de variables de estudio	36
3.2.1	Variables cinemáticas	36
3.2.2	Modos de trabajo.....	37
3.2.3	Variables Operacionales de motor	37
3.2.4	Parámetros de rendimiento a nivel de motor y vehículo.....	37
3.3	Selección e instalación de equipos y sensores	38
3.3.1	Recopilador de datos CAN Edge 2	39
3.3.2	Flujómetro de combustible DFM ACAN 100	41
3.3.3	Módulo CANmod.Input.....	42
3.3.4	Módulo CANmod.gps.....	44
3.3.5	Cable de comunicación de Flujómetros DFM ACAN 100.....	46
3.4	Pruebas piloto y configuración de dispositivos	46
3.4.1	Pruebas de Comunicación CAN: CanEdge2, CANmod.input, Flujómetros de combustible y Sensores externos.....	46
3.4.2	Configuración de CANedge2 + CANmod.input.....	47

3.4.3	Configuración de los flujómetros.....	48
3.4.3.1	Integración de flujómetros a través de la red CAN.....	49
3.4.4	Instalación física de los flujómetros	50
3.4.5	Instalación de componentes	51
3.5	Campaña experimental.....	52
3.5.1	Características generales de las pruebas	52
3.5.2	Descripción de la ruta realizada	53
3.5.3	Descripción de las labores agrícolas evaluadas	54
3.5.4	Protocolo de adquisición de datos.....	54
3.6	Procesamiento y análisis de datos.....	54
3.6.1	Descarga y decodificación de datos	55
3.6.2	Transformación de señales y segmentación operativa.....	56
3.6.3	Cálculo y estimación de indicadores energéticos y ambientales	57
3.6.4	Creación de gráficos y visualización de datos	59
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	60
4.1	Análisis global de eficiencia y perfil ambiental.....	60
4.2	Caracterización del comportamiento dinámico del motor	61
4.2.1	Perfil topográfico y gradiente de pendiente de la jornada	61
4.2.2	Perfil de régimen de giro (RPM)	62
4.2.3	Perfil de velocidad y sincronización del acople agrícola.....	63
4.2.4	Análisis de la distribución del tiempo operativo.....	63
4.3	Caracterización del consumo de combustible y demanda de potencia	64
4.3.1	Sincronización entre régimen y flujo de combustible.....	64
4.3.2	Tasa de consumo de combustible instantáneo	65
4.3.3	Consumo de combustible acumulado	66
4.3.4	Consumo total de combustible por actividad.....	66
4.3.5	Potencia efectiva generada.....	67

4.3.6	Mapa de desempeño energético	68
4.4	Análisis de indicadores de eficiencia específica y conversión energética.....	69
4.4.1	Consumo específico de combustible (BSFC)	69
4.4.2	Eficiencia térmica al freno (BTE).....	70
4.4.3	Análisis de mapas de calor BTE vs BSFC.....	71
4.5	Evaluación del impacto ambiental	72
4.5.1	Análisis de la tasa de emisión de CO ₂	72
4.5.2	Factor de emisión específico.....	73
4.5.3	Evaluación del consumo por hora de trabajo e impacto de la huella de carbono	74
4.6	Factores de consumo y emisión	75
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1	Conclusiones	76
5.2	Recomendaciones	77
ANEXOS	79
ANEXO 1:	CÓDIGO DE CONFIGURACIÓN DEL CANEDGE 2.....	79
ANEXO 2:	CONEXIÓN DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA	81
ANEXO 3:	FASE DE TRASLADO DEL TRACTOR.....	82
ANEXO 4:	PANEL DE INSTRUMENTOS TRACTOR NEW HOLLAND 7630.....	82
Referencias bibliográficas.....		83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de maquinaria agrícola.....	22
Tabla 2. Impacto ambiental de transporte agrícola.....	26
Tabla 3. Normativa Tier (Estados Unidos) y Euro (Europa).....	27
Tabla 4. Límites de emisiones en la Fase I.....	28
Tabla 5. Límites de emisiones en la Fase II.....	28
Tabla 6. Límite de emisiones en la Fase III A.....	28
Tabla 7. Límites de emisiones en la Fase III B.....	29
Tabla 8. Límites de emisiones en la Fase IV.....	29
Tabla 9. Características técnicas New Holland 7630.....	35
Tabla 10. Variables cinemáticas.....	36
Tabla 11. Modos de trabajo del tractor.....	37
Tabla 12. Variables disponibles del tractor.....	37
Tabla 13. Parámetros estimados de rendimiento.....	38
Tabla 14. Equipos y materiales utilizados.....	39
Tabla 15. Especificaciones técnicas CAN Edge2.....	40
Tabla 16. Asignación de pines del CAN Edge2.....	40
Tabla 17. Características técnicas Flujómetro DFM ACAN 100.....	41
Tabla 18. Especificaciones técnicas CANmod.input.....	42
Tabla 19. Disposición de pines conector frontal CANmod.input.....	43
Tabla 20. Especificaciones técnicas del módulo CANmod.gps.....	44
Tabla 21. Disposición de pines CANmod.gps.....	45
Tabla 22. Valores predeterminados Time Valid Signal y Time Value Signal.....	48
Tabla 23. Características del terreno agrícola.....	52
Tabla 24. Valores promedios de eficiencia y factores de emisión y consumo.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Trabajo de transporte, b) Trabajo de arrastre, c) Trabajo de empuje	24
Figura 2. Comparación del tamaño del material particulado. a) Tamaño del cabello humano. b) Tamaño del material particulado.	25
Figura 3. Analizador de gases de escape.	30
Figura 4. Banco de pruebas de motor	31
Figura 5. Máquina agrícola con sistema PEMS.....	32
Figura 6. Mapa de motor.....	33
Figura 7. Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación	34
Figura 8. Tractor New Holland 7630.....	35
Figura 9. Recopilador de datos CAN Edge 2.....	39
Figura 10. Configuración de pines del CAN Edge2	40
Figura 11. Flujómetro de combustible DFM ACAN 100.....	41
Figura 12. Módulo CANmod.input.....	42
Figura 13. Conector frontal CANmod.input	43
Figura 14. Conector posterior CANmod.input	44
Figura 15. Módulo CANmod.gps	44
Figura 16. Conector frontal CANmod.gps.....	45
Figura 17. Cable de conexión común	46
Figura 18. Herramienta de configuración CSS Electronics	47
Figura 19. Software Service S6 DFM.....	49
Figura 20. PGN de flujómetro proporcionado por Technoton.....	49
Figura 21. Base de datos de Technoton	50
Figura 22. Esquema de instalación "Diferencial"	50
Figura 23. Instalación de flujómetros	51
Figura 24. Conexión del sistema de telemetría.....	51
Figura 25. Ruta de traslado del tractor.....	53
Figura 26. Ruta de trabajo realizada por el tractor.....	53
Figura 27. Diagrama de flujo de procesamiento y análisis de datos.....	55
Figura 28. Interfaz de asammdf	55
Figura 29. Extracto de código de clasificación según la operación.....	56
Figura 30. Relación de factores de emisión y consumo por actividad.....	60
Figura 31. Perfil topográfico y gradiente de pendiente de la jornada.....	62

Figura 32. Perfil de régimen de giro	62
Figura 33. Perfil de velocidad y sincronización del acople agrícola	63
Figura 34. Porcentaje de tiempo por actividad	64
Figura 35. Sincronización entre régimen de motor y consumo de combustible	64
Figura 36. Tasa de consumo de combustible instantáneo por actividad.....	65
Figura 37. Curva de consumo de combustible acumulado	66
Figura 38. Consumo total de combustible por actividad	67
Figura 39. Potencia efectiva generada por actividad	68
Figura 40. Mapa de desempeño energético.....	68
Figura 41. Consumo de combustible específico por actividad realizada.....	69
Figura 42. Eficiencia térmica al freno por actividad.....	70
Figura 43. a) Mapa de calor BSFC, b) Mapa de calor BTE.....	71
Figura 44. Mapa de calor de la emisión de CO ₂	72
Figura 45. Factor de emisión específico por actividad	73
Figura 46. Promedios de consumo de combustible y tasa de emisión de CO ₂ por hora de trabajo.	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	57
Ecuación 2.....	57
Ecuación 3.....	57
Ecuación 4.....	58
Ecuación 5.....	58
Ecuación 6.....	58
Ecuación 7.....	58
Ecuación 8.....	58
Ecuación 9.....	59
Ecuación 10.....	59
Ecuación 11.....	59
Ecuación 12.....	59

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación

La protección del medio ambiente natural es actualmente un problema grave que tiene preocupada a la sociedad. Los motores de combustión interna, comúnmente se usan en la mayoría de los vehículos de transporte y vehículos de trabajo. Su funcionamiento provoca la emisión de sustancias tóxicas para el medio ambiente natural [1].

La Organización Mundial de la Salud designó a los gases de escape que emanan los motores diésel como cancerígenos de clase 1, ubicándose en la misma categoría de productos letales como el asbesto, el arsénico y el gas mostaza [2].

En la actualidad, la agricultura busca mejorar la eficiencia y productividad de sus cultivos mediante el uso intensivo de la maquinaria agrícola que se considera como un factor negativo que provoca el calentamiento global [3]. Los tractores son una parte fundamental de este sector, en condiciones reales de operación generan gran cantidad de consumo de combustible y gases contaminantes de escape, especialmente en condiciones de trabajos fuertes.

En el mundo, las emisiones de Material Particulado (PM) producidas por tractores representan el 60 % del total de emisiones de PM en la maquinaria agrícola [4]. Es una cantidad muy elevada que afecta a la sociedad. En nuestro medio no es la excepción, existe gran cantidad de trabajo agrícola en donde se utiliza como herramienta a los tractores.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Estimar el consumo de combustible y emisiones en tractores agrícolas por telemetría en condiciones reales de operación usando un recopilador de datos.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Seleccionar un sensor de CO₂ y un recopilador de datos para la medición de distintos parámetros de funcionamiento del tractor.
- Seleccionar el vehículo a ser medido.

- Medir el consumo de combustible y emisiones de CO₂ del tractor en condiciones reales de operación usando los equipos seleccionados.
- Determinar los factores de consumo de combustible y emisiones del tractor.

1.3 Alcance

Este proyecto tiene como objetivo realizar una medición en distintos modos de operación de un tractor agrícola: ralentí, en trabajo de arado y transporte en carretera. Para ello, se utilizarán un recopilador de datos y se adaptarán sensores externos con el fin de obtener mediciones que demuestren parámetros de funcionamiento en condiciones reales de operación para poder determinar los factores de consumo de combustible y emisiones en dicho tractor agrícola.

1.4 Justificación

La agricultura está en búsqueda constante de aumentar su rendimiento, un punto clave para lograrlo es la eficiencia de las máquinas agrícolas, especialmente los tractores. Los tractores son una de las máquinas de trabajo que más consume combustible y genera emisiones, estos vehículos de trabajo afectan al cambio climático. Las operaciones agrícolas (por ejemplo, arar, sembrar, rotar y otras) necesitan mucho combustible para la maquinaria [1].

La sociedad se ha preocupado por el impacto ambiental de los vehículos, esto ha generado una búsqueda de soluciones para enfrentar dicha contaminación ambiental, para abordar este tema, es fundamental obtener estadísticas de funcionamiento de los tractores en condiciones reales de operación.

Con el uso de la telemetría, que permite la monitorización en tiempo real de características de funcionamientos de tractores, especialmente con los Sistemas Portátiles de Medición (con sus siglas en inglés PEMS) que son métodos eficaces para obtener datos relevantes sobre emisiones de vehículos [5]. Podemos analizar estimaciones precisas y efectivas de emisiones de gases y consumo de combustible excesivo de maquinaria agrícola, especialmente en tractores en condiciones reales de operación. Este método permitirá a los agricultores optimizar su rendimiento y reducir su impacto ambiental.

Este documento obtendrá datos detallados sobre el consumo de combustible y emisiones de dióxido de carbono generadas por máquinas agrícolas, en este caso tractores que trabajarán en diferentes modos de operación. Una vez obtenidas las diferentes mediciones se realizará un análisis exhaustivo, en donde se podrá estimar el comportamiento en las diferentes funciones

del vehículo y evaluar su rendimiento. Esta investigación no solo aportará conocimiento crucial para adoptar cambios en el sistema agrícola para prevenir el efecto del cambio climático, sino que también impulsará a crear nuevas tecnologías que sean limpias y eficientes, mejorando así la sostenibilidad de la agricultura.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan la investigación sobre el desempeño energético y ambiental de los tractores agrícolas. En primera instancia, se presenta una revisión sobre investigaciones que han monitoreado en condiciones reales de operación, posteriormente, se profundiza la termodinámica de los motores de combustión interna, el análisis de emisiones y las tecnologías avanzadas de recopilación de datos. Este sustento científico permite interpretar los resultados experimentales obtenidos y compararlos con las investigaciones científicas de la ingeniería agrícola actual.

2.1 Antecedentes

La comunidad científica internacional ha intensificado los estudios del desempeño energético y eficiencia de la maquinaria agrícola debido al impacto en la huella de carbono y en los costos de producción.

Investigadores en China realizaron un estudio a tractores en condiciones reales de operación, mediante un análisis comprobaron que los tractores al operar en diferentes funciones, el consumo de combustible y emisiones variaban según su función. El nivel de consumo de combustible y emisiones se relaciona con la potencia del motor. Se realizó la prueba en un tractor Dongfanghong 2204 de YTO Group Corporation. Obtuvieron datos en los que se pudo comprobar que el CO, CO₂, y NO_x en el modo de labranza o arado es 1.40, 4.53, 1.67 veces mayor que la del modo en movimiento normal. El motor funciona en un rango de potencia baja (<30kW) durante el 56% del tiempo y a alta velocidad del motor (>1500 rpm) y alto par motor durante el 26% de tiempo [6].

Se realizaron pruebas contaminantes en condiciones reales de operación a un tractor del año 2007, homologado según las normas Stage III/ Tier 3, utilizando un dispositivo de medición móvil de emisiones SEMTECH DS, que mide la concentración de gases de escape, este es un dispositivo PEMS. En este estudio se utilizó un dispositivo con Sistema de Posicionamiento Geográfico (con sus siglas en inglés GPS) para analizar la geografía de la ruta del tractor. Luego de hacer las pruebas se determinó que el CO₂ máximo fue de (20.8 g/s) en un punto de medida a velocidad de rotación de (1800;2000rpm) [7].

Se realizaron varias pruebas en un tractor agrícola con Tier III con una potencia de 198 kW a 2300 rpm. Se utilizó un dinamómetro de motor que tenía una velocidad máxima de 3600 rpm y el par máximo de 7200 Nm. Además, un equipo PEMS realizó las mediciones de escape; se calentó el motor hasta alcanzar la temperatura óptima de 88 °C para proceder a realizar las mediciones. El consumo de combustible (g/s) se determinó relacionando los valores con la velocidad del motor dando como resultado que el valor máximo de consumo de combustible fue de 12.3 g/s a un régimen máximo de 2100 rpm y un par de 900 Nm [8]. También se pudo verificar que la contaminación ambiental puede deberse a factores como la calidad de combustible, arranque en frío del motor o desgaste de los componentes, pueden aumentar la masa de PM.

Para este estudio se escogió un tractor agrícola de fase IIIA que posee en el sistema de escape de gases un catalizador de oxidación diésel (con sus siglas en inglés DOC) en funcionamiento de condiciones reales, simulando una siembra, siendo pilotado por un conductor calificado para realizar la prueba. Se utilizó un sistema PEMS, utilizaron un dispositivo SEMTECH que toma una muestra de gas del caudalímetro de escape. Obteniendo buenos resultados luego de la instalación del catalizador que mediante un análisis comparativo de las emisiones de escape se ha demostrado que la reducción de emisiones alcanzó casi el 50% [9].


Se realizaron cuatro estudios a un mismo tractor en condiciones reales de funcionamiento, una prueba sin dispositivo de postratamiento y tres pruebas luego de instalar dispositivos de postratamiento para determinar la efectividad de los catalizadores. Un conductor profesional operó el tractor a una temperatura ambiente de 25°C en ralentí durante 5 minutos y también en condiciones de trabajo, arando la tierra en un periodo de 5 minutos. Todo este proceso se realizó 3 veces para evitar tener errores y que las mediciones sean precisas. Obteniendo resultados que mediante un análisis se verificó que la tasa de CO en ralentí fue muy baja, pero cuando entró en modo de operación el CO se disparó. Luego de instalar el catalizador se pudo observar una reducción de las tasas de emisión de los gases contaminantes (CO, HC, NOx, y PM, dando excelentes resultados [10].

2.2 Tipos de maquinaria agrícola

La maquinaria agrícola tiene diversos campos de aplicación, a continuación, en la Tabla 1 se puede identificar los diferentes tipos de maquinaria y también cuál es su función en el transporte y la agricultura.

Tabla 1. Clasificación de maquinaria agrícola

Tipo	Clasificación	Descripción	Figura
<p>Vehículos auto propulsados</p>	<p>Motocultores y máquinas equiparadas</p>	<p>Tienen un solo eje y es conducido a pie.</p>	
	<p>Tractocarros agrícolas</p>	<p>Tiene dos o mas ejes y solamente se utiliza para transporte.</p>	
	<p>Máquinas agrícolas automotrices</p>	<p>Tienen dos o mas ejes y es concebido para efectuar trabajos.</p>	
<p>Vehículos remolcados</p>	<p>Máquinas agrícolas remolcadas</p>	<p>Arrastrado por otro vehículo agrícola para efectuar diversos trabajos en la agricultura.</p>	
	<p>Aperos agrícolas</p>	<p>Son los instrumentos agrícolas que sirven como herramientas de trabajo para las diferentes operaciones que realiza un tractor.</p>	

<p>Tractores agrícolas</p>	<p>Tractores</p>	<p>Es un vehículo autopropulsado con dos o más ejes y es concebido para arrastrar vehículos agrícolas para realizar trabajos de agricultura o transporte.</p>	
-----------------------------------	------------------	---	---

Tomado de: Jonama A, Homologación de vehículos especiales agrícolas (2009) [11].

Normalmente en el tractor posee ruedas neumáticas, las delanteras son directrices, es decir, son arrastradas por las ruedas motrices traseras, pero en algunos casos tanto las delanteras como las traseras son motrices [12]. También existen otros tractores que remplazan las ruedas neumáticas por ruedas de cadenas giratorias en cada lado del tractor, se les denomina “tractores oruga” [12].

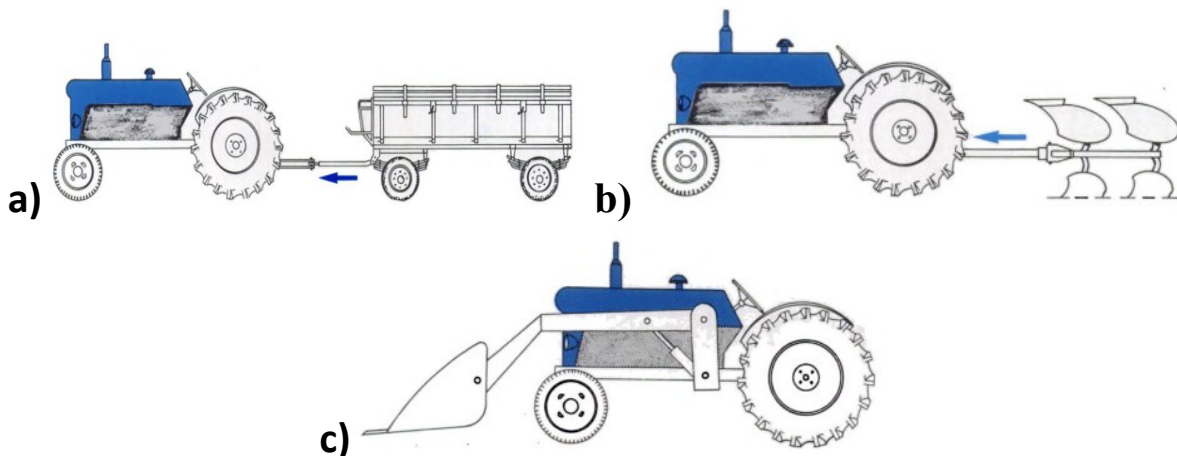
2.3 Condiciones de operaciones del motor y tren de potencia que realiza un tractor

Los tractores son máquinas de trabajo que utilizan implementos para realizar una amplia gama de tareas y trabajos para cumplir los diferentes propósitos de producción [13]. Los perfiles de operación de la maquinaria agrícola son importantes porque pueden ayudar a entender las condiciones que tiene que cumplir la máquina agrícola (por ejemplo, la geografía del campo y el tipo de conducción del operador) [13].

Los tractores agrícolas son máquinas con mucha potencia y elementos de operación, son utilizados en trabajos de tracción y transporte de otros equipos, para realizar distintas funciones en el campo [14]. El rendimiento del tractor depende principalmente de la potencia del motor, distribución del peso sobre las ruedas motrices, tipo de enganche y la superficie del suelo [15].

El tractor es una máquina multifuncional que puede realizar diferentes funciones en la agricultura. Tareas que incluyen trabajos de transporte, arrastre y empuje, respectivamente, como se observa en la Figura 1. Además de tener la capacidad de acoplar diversos implementos y accesorios para realizar tareas específicas como siembra, arado o cosecha [12].

Figura 1. a) Trabajo de transporte, b) Trabajo de arrastre, c) Trabajo de empuje



Tomado de: Atares A, Pedro V, Tractores y motores agrícolas (1996) [12].

2.4 Emisiones de gases en motores diésel

La contaminación del aire es un peligro inminente para la salud de la sociedad y para el medio ambiente. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) aproximadamente la contaminación del aire causa 1,3 millones de muertes al año en todo el mundo [16]. Se puede afirmar que los gases de escape contaminantes para el medio ambiente también son perjudiciales para la sociedad, estos gases pueden ser nocivos para la salud. Pueden causar enfermedades graves para el sistema respiratorio o afectar la piel, y a largo plazo, pueden provocar la muerte [17]. En especial, la emisión de gases de CO_2 ha empeorado el equilibrio de la atmósfera, liberando aproximadamente ocho mil millones de toneladas al año, debido al proceso de combustión de fósiles en el transporte [18].

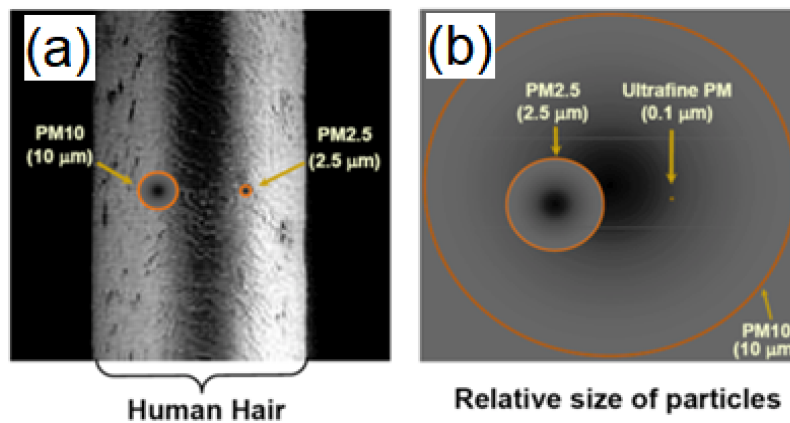
La temperatura excesiva durante el proceso de combustión del motor es la causante principal de la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x) [19]. En la atmósfera los óxidos de nitrógeno son capaces de reaccionar químicamente con otros compuestos orgánicos volátiles para producir ozono, que es perjudicial para la salud, provocando enfermedades y mortalidad [20]. La emisión de gases que provocan contaminación del aire de los vehículos diésel son más graves en zonas urbanas con grandes cantidades de tráfico vehicular [21]. La emisión de óxidos de nitrógeno de los automóviles diésel aumenta cuando se operan los vehículos a altitudes superiores a 1500 m de altitud sobre el nivel del mar [22].

Las fuentes móviles que usan combustibles fósiles emiten una gran cantidad de contaminantes gaseosos y PM. El material particulado en la atmósfera en su mayoría es producido por los

vehículos automotores. El principal contribuyente del material particulado es el motor a Diesel [23]. El material particulado está conformado por carbono negro (hollín), carbono orgánico y otros compuestos inorgánicos [24]. En Europa en los últimos 15 años, las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos ligeros han disminuido entre un 25% y un 30% [25].

El tamaño del material particulado (PM) es muy diminuto, a simple vista no se lo puede observar, las partículas menores a $10\ \mu\text{m}$ son de mayor interés porque son fácilmente respirables y penetran a los pulmones [26]. A continuación, la Figura 2 muestra una comparación del tamaño de un cabello humano y el tamaño del material particulado.

Figura 2. Comparación del tamaño del material particulado. a) Tamaño del cabello humano. b) Tamaño del material particulado.



Tomado de: Siedlecki, *Analysis of the Possibilities of Reduction of Exhaust Emissions from a Farm Tractor by Retrofitting Exhaust Aftertreatment* (2022) [9].

2.5 Impacto ambiental y gases contaminantes del transporte de tractores

La Maquinaria Móvil no de Carretera (con sus siglas en inglés NRMM), incluyendo la maquinaria agrícola, es una fuente significativa de la contaminación del aire. En los últimos años, se ha evidenciado un crecimiento contaminante en muchos países alrededor del mundo [2]. El uso de la maquinaria agrícola representa el 21% del total de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [27]. El incremento en el uso de la maquinaria agrícola ha provocado mayores emisiones de gases de escape, generando un impacto perjudicial que afecta al ecosistema y una influencia negativa en la salud humana [28].

La pendiente de las carreteras es un factor importante en las emisiones de la maquinaria agrícola. Por lo tanto, es importante mejorar los ciclos de conducción, para reducir el consumo de combustible y las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) [29]. De igual manera, es importante adoptar soluciones tecnológicas como el Filtro de Partículas de Escape (con sus

siglas en inglés DPF) que reduce las partículas de los gases de escape o la Recirculación de Gases de Escape (con sus siglas en inglés EGR) que recircula los gases de escape, estos sistemas ayudan a reducir el nivel de emisiones y por ende la contaminación del medio ambiente [30].

El transporte no de carretera es uno de los principales contribuyentes de la contaminación ambiental que existe en el mundo, es el responsable de aumentar los gases GEI y producir lluvias ácidas debido a las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Además, es la primera fuente de contaminación auditiva por el ruido que produce [31]. En la Tabla 2 se puede observar las consecuencias del transporte agrícola, incluyendo el impacto en la calidad del aire y la contribución a la lluvias ácidas. Esta tabla también detalla cómo estas emisiones afectan a los ecosistemas del planeta.

Tabla 2. *Impacto ambiental de transporte agrícola*

	AIRE	AGUA	ECOSISTEMA
TRANSPORTE AGRÍCOLA	Aumento de contaminación del medio ambiente por emisiones de CO ₂ .	Contaminación de aguas subterráneas por lavado de carreteras.	Introducción de especies en aguas de sentina.

Tomado de: European Environment Agency, Europe's Environment: The Sobris Assesment (1995) [32].

2.6 Normativa de emisiones generadas por tractores

La Unión Europea, Estados Unidos y Japón decidieron introducir normativas que limiten las emisiones de gases de escape de los vehículos automóviles, inicialmente en la normativa no se tomaba en cuenta a tractores y maquinaria agrícola, pero luego se incluyen tomando en cuenta el tipo de operación [33]. En la actualidad, los tractores tienen que cumplir la normativa “Euro IV” o “Tier IV final”, al menos en los tractores con más potencia, pero en un futuro todos tendrán que cumplir la normativa más exigente [33].

Los gases contaminantes de escape de los tractores agrícolas son un impacto perjudicial a la salud y al medio ambiente. Para prevenir enfermedades han reducido estas emisiones con la adaptación de normas que se están endureciendo continuamente [34]. Los gobiernos de todo el mundo han adoptado estándares de emisiones para regular las emisiones de máquinas móviles no de carretera, Estados Unidos y Europa han implementado las regulaciones de emisiones más

estrictas y avanzadas del mundo [10]. En la Tabla 3 se puede observar el año de la entrada en vigor de las normativas Tier y Euro.

Tabla 3. *Normativa Tier (Estados Unidos) y Euro (Europa)*

Año inicio	Estados Unidos	Unión Europea
1990	Tier 1	Fase I
2001	Tier 2	Fase II
2006	Tier 3	Fase IIIA
2011	Tier 4 provisional	Fase IIIB
2015/18	Tier 4 final	Fase IV

Tomado de: Lombraña M, Reducción de emisiones en los motores diésel (2019) [35].

2.6.1 Normativas Euro (Europa).

Las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NOx) y las partículas (PM) producidos por automóviles y camiones han generado la atención de la sociedad por la protección del medio ambiente, por estas razones, la Unión Europea (UE) decidió en 1994 introducir estándares de regulación de emisiones llamados Normas EURO. Actualmente, EURO VI es el estándar más reciente de vehículos, que se lanzó el 1 de septiembre de 2015 [36].

2.6.2 Normativa Tier (Estados Unidos).

La legislación estadounidense ha adoptado límites estrictos de emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) y también hidrocarburos (HC) de los motores, estos estándares se identifican como Tiers (es decir, 1, 2, 3, 4, 5) [30].

A continuación, se puede observar los niveles máximos de emisiones de las máquinas móviles no de carretera, límites de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y de material particulado (PM) según las diferentes fases de regulación de emisiones.

En la Tabla 4 se muestran los límites de emisiones del escape como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM) en función de la potencia neta del motor de combustión interna de las máquinas móviles no de carretera para la normativa de Fase I.

Tabla 4. Límites de emisiones en la Fase I

Potencia neta (P) (kW)	Monóxido de carbono (CO) (g/kWh)	Hidrocarburos (HC) (g/kWh)	Óxidos de nitrógeno (NOx) (g/kWh)	Material particulado (PM) (g/kWh)
$130 \leq P \leq 560$	5,0	1,3	9,2	0,54
$75 \leq P < 130$	5,0	1,3	9,2	0,70
$37 \leq P < 75$	6,5	1,3	9,2	0,85

Tomado de: Lombraña M, Reducción de emisiones en los motores diésel (2019) [35].

En la Tabla 5 se puede observar las emisiones máximas de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y además material particulado (PM) que puede presentar un motor de combustión interna de las máquinas móviles no de carretera para la normativa de Fase II.

Tabla 5. Límites de emisiones en la Fase II

Potencia neta (P) (kW)	Monóxido de carbono (CO) (g/kWh)	Hidrocarburos (HC) (g/kWh)	Óxidos de nitrógeno (NOx) (g/kWh)	Material particulado (PM) (g/kWh)
$130 \leq P \leq 560$	3,5	1,0	6,0	0,2
$75 \leq P < 130$	5,0	1,0	6,0	0,3
$37 \leq P < 75$	5,0	1,3	7,0	0,4
$18 \leq P < 37$	5,5	1,5	8,0	0,8

Tomado de: Lombraña M, Reducción de emisiones en los motores diésel (2019) [35].

La Tabla 6 hace referencia a las emisiones de gases de escape de motor, emisiones de monóxido de carbono (CO), la suma de hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM) en las normativas de Fase III A.

Tabla 6. Límite de emisiones en la Fase III A

Potencia neta (P) (kW)	Monóxido de carbono (CO) (g/kWh)	Suma de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (HC+NOx) (g/kWh)	Material particulado (PM) (g/kWh)
$130 \leq P \leq 560$	3,5	4,0	0,2
$75 \leq P < 130$	5,0	4,0	0,3

$37 \leq P < 75$	5,0	4,7	0,4
$18 \leq P < 37$	5,5	7,5	0,6

Tomado de: Lombraña M, Reducción de emisiones en los motores diésel (2019) [35].

A continuación, en la Tabla 7 se puede evidenciar, la máxima cantidad de emisiones de escape de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), y material particulado (PM) en un motor de combustión interna (MCI) dispuesto en la normativa de la Fase III B.

Tabla 7. Límites de emisiones en la Fase III B

Potencia neta (P) (kW)	Monóxido de carbono (CO) (g/kWh)	Hidrocarburos (HC) (g/kWh)	Óxidos de nitrógeno (NOx) (g/kWh)	Material particulado (PM) (g/kWh)
$130 \leq P \leq 560$	3,5	0,19	2,0	0,025
$75 \leq P < 130$	5,0	0,19	3,3	0,025
$56 \leq P < 75$	5,0	0,19	3,3	0,025
$37 \leq P < 56$	5,5	4.7		0,025

Tomado de: Lombraña M, Reducción de emisiones en los motores diésel (2019) [35].

Actualmente los tractores agrícolas se rigen a la normativa de la Fase IV, en donde se miden los límites de emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM). A continuación, en la Tabla 8 se puede identificar los valores de gases de escape.

Tabla 8. Límites de emisiones en la Fase IV

Potencia neta (P) (kW)	Monóxido de carbono (CO) (g/kWh)	Hidrocarburos (HC) (g/kWh)	Óxidos de nitrógeno (NOx) (g/kWh)	Material particulado (PM) (g/kWh)
$130 \leq P \leq 560$	3,5	0,19	0,4	0,025
$56 \leq P < 130$	5,0	0,19	0,4	0,025

Tomado de: Lombraña M, Reducción de emisiones en los motores diésel (2019) [35].

2.7 Principios de medición de dióxido de carbono

2.7.1 Mediciones estáticas.

Los fabricantes de motores están obligados a someter a los motores por pruebas de emisiones, el procedimiento está establecido en la norma internacional ISO 8178, el cual establece que se debe medir los gases emitidos de los motores no destinados a la carretera en ocho condiciones de funcionamiento: motor en ralentí, a diferentes cargas (100%, 75%, 50% y 10% de la potencia nominal) y motor girando a la velocidad que genere el par máximo (100%, 75% y 50% de la potencia máxima en ese punto [37].

Se puede determinar con un analizador de gases de escape como se puede observar en la Figura 3, este dispositivo mide la concentración de gases de escape [38]. Durante estas pruebas, el motor se mantiene en funcionamiento durante aproximadamente 30 segundos para determinar los gases de escape emitidos [39].

Figura 3. *Analizador de gases de escape.*

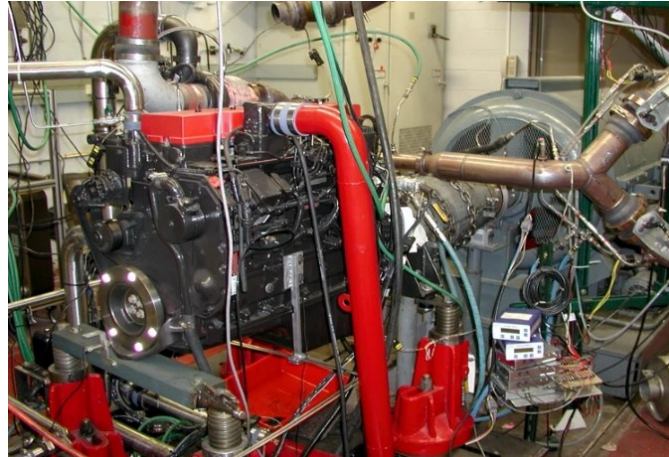


Tomado de: Tipanluisa L, et al, Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades (2017) [39].

A diferencia de los vehículos livianos, cuya homologación se basa en ciclos de conducción sobre chasis, los motores destinados a maquinaria pesada y de trabajo se someten a ensayos de emisiones en bancos de pruebas dinamométricos, como se observa en la Figura 4. Es decir, la métrica de distancia recorrida es reemplazada por la eficiencia del trabajo realizado. Bajo este principio el ensayo permite determinar la emisión específica (g/kWh). Esta norma establece los límites de emisiones de gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO),

hidrocarburos no quemados (HC), material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO₂), siendo este último el principal indicador del desempeño energético y la huella del carbono del motor [40].

Figura 4. Banco de pruebas de motor



Tomado de: Pirjola L, Lappi M, A Novel Mobile Laboratory for “Chasing” City Traffic (2004) [41].

2.7.2 Mediciones dinámicas.

En Septiembre de 2017 se adoptó un nuevo sistema de medición de emisiones en condiciones reales de conducción (con sus siglas en inglés RDE), con el objetivo de realizar controles de emisiones en condiciones de operaciones de funcionamiento real, mediante sistemas PEMS [42]. Para ello se utiliza SEMTECH que es el sistema de medición portátil PEMS que consta de un dispositivo de medición de gases y un medidor de flujo de escape, es el sistema más conocido y eficaz para obtener mediciones de emisiones de CO₂ en condiciones reales de funcionamiento del vehículo [43].

2.8 Sistemas de Medición de Emisiones Portables (con sus siglas en inglés PEMS)

Aunque los límites de emisiones se han vuelto cada vez más estrictos en la última década. Según Martin Weiss, el transporte por carretera sigue siendo la fuente más importante de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO), contribuyendo con el 41% y el 34% respectivamente, de las emisiones totales de estos contaminantes en la Unión Europea [44]. Es por esto por lo que se han realizado investigaciones que utilizan equipos PEMS que permiten medir las emisiones de escape en condiciones operativas reales, durante el trabajo de campo como se puede observar en la Figura 5. La metodología utilizada en la investigación es la más precisa y confiable disponible actualmente [45].

Figura 5. Máquina agrícola con sistema PEMS



Tomado de: Rymaniak L, Use of emission indicators related to CO₂ emissions in the ecological assessment of an agricultural tractor (2021) [46].

Los dispositivos portátiles permiten recopilar datos que posteriormente permiten conocer el comportamiento de los vehículos en diferentes pruebas en condiciones reales de operación. Debido a la rápida variación de los parámetros de los motores en condiciones reales de funcionamiento y al avance de los sistemas de postratamiento, los PEMS se caracterizan por una alta precisión de medición. Por tanto, dichos equipos de medición suelen incluir soluciones (sensores, algoritmos) que realizan dichos procedimientos [47].

Los PEMS más actuales cuentan con modernos analizadores de gases, GPS, softwares y novedosos medidores de flujo de escape que ayudan a mejorar la precisión de las mediciones de gases contaminantes [35].

2.9 Sistemas de Monitoreo de Emisiones del Vehículo (con sus siglas en inglés SEMS)

Es una técnica de medición basada en el uso del conector de diagnóstico (OBD II) para obtener información de sensores del vehículo. Además, emplea pequeños sensores y algunos elementos importantes como el sensor de óxido de nitrógeno (NOx) y el GPS para observar la altitud, velocidad y la ruta que hace el vehículo mientras se realiza las mediciones [48]. En la actualidad, se pueden obtener los parámetros de funcionamiento de los tractores modernos mediante tecnologías CAN-BUS junto con protocolos SAE J1939 e ISO 11783 [49].

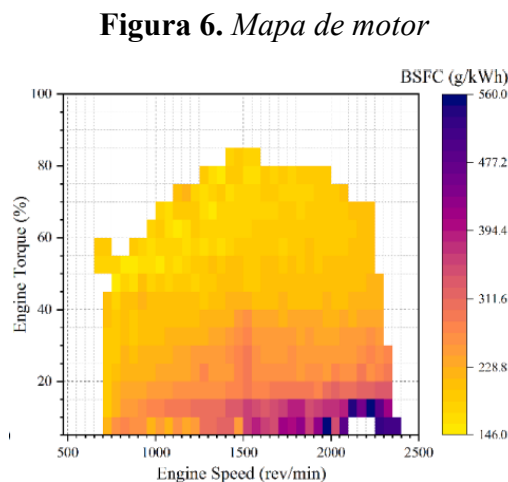
2.10 Recopilador de datos (Datalogger)

Los recopiladores de datos son dispositivos electrónicos que tienen la capacidad de registrar, analizar y transmitir variables cinemáticas y parámetros del motor a frecuencias de muestreo elevadas durante pruebas de operación en ruta [50]. Complementariamente, se integra un

sistema de posicionamiento global (GPS), el cual provee datos geográficos precisos que permiten determinar la ubicación espacial, la velocidad de desplazamiento y la altitud del vehículo en tiempo real [51]. Asimismo, estos dispositivos son capaces de integrarse a una red CAN BUS, lo que permite el monitoreo de los protocolos de comunicación interna del motor. Toda la información recolectada se almacena en una memoria interna, facilitando la descarga y el análisis estadístico [52].

2.11 Mapas de motor

Los mapas de motor son representaciones gráficas que establecen la correlación entre las principales variables de operación, permitiendo visualizar el comportamiento bajo cualquier condición operativa. La importancia de estos diagramas es que tienen la capacidad de determinar con precisión el punto de operación del motor en donde trabaja de manera más eficiente. Estos gráficos suelen utilizarse para comparar el rendimiento de motores o identificar puntos específicos de carga, régimen o potencia [53]. Como se observa en la Figura 6, la interpretación de estos mapas se realiza mediante una escala de colores.



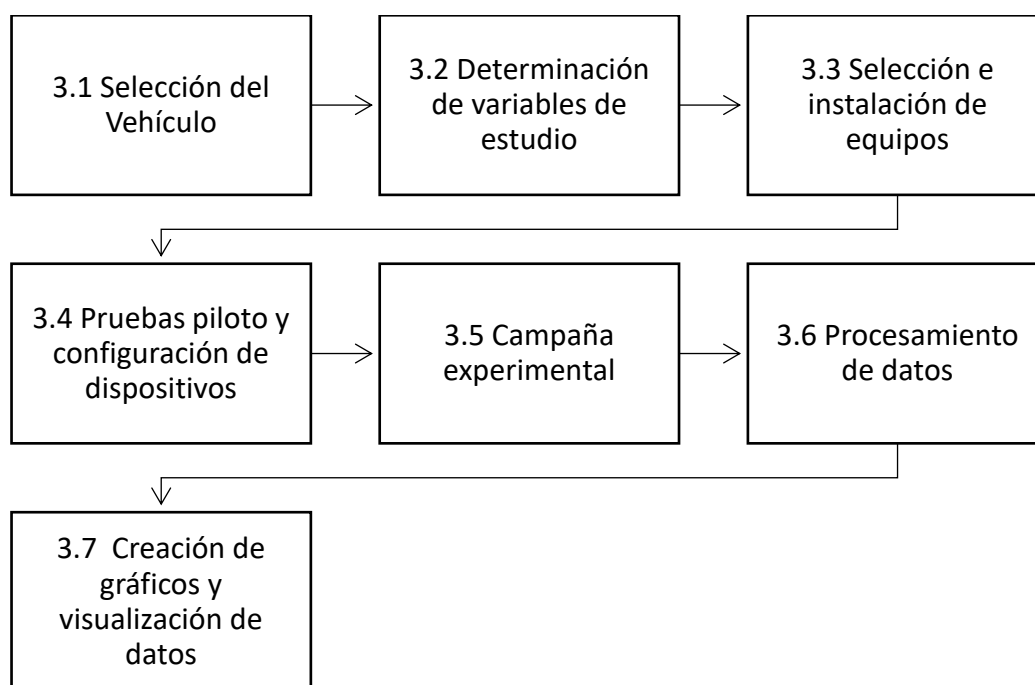
Tomado de: Hou et al L, Measurement of engine and maps-based emission prediction of agricultural tractor under actual operating conditions (2023) [54].

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, en la Figura 7 se detallan los pasos llevados a cabo durante la investigación, así como la configuración de equipos utilizados para la ejecución de las pruebas experimentales. También se describe el proceso de instalación y calibración de los dispositivos, junto con los parámetros establecidos para el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos. Además, se incluye la configuración del software de apoyo empleado en el procesamiento, análisis y visualización de los datos recopilados.

Figura 7. Diagrama de flujo de actividades del proyecto de titulación



(Autoría propia)

3.1 Selección del vehículo

La selección del vehículo no se realizó únicamente a criterios de disponibilidad, sino a su relevancia técnica dentro del parque automotor agrícola ecuatoriano. A continuación, se detallan los criterios técnicos que justifican la elección del tractor utilizado, así como las especificaciones mecánicas que definen su capacidad operativa y perfil de emisiones.

3.1.1 Criterio de selección

En Ecuador, los principales cultivos de papa se concentran en la región Sierra, destacándose la provincia del Carchi como la mayor productora a nivel nacional, con el 44% del total [55]. Esta

actividad agrícola requiere una considerable flota de maquinaria, especialmente tractores, utilizados en labores fundamentales como la preparación de suelo, siembra y fumigación.

3.1.2 Selección de vehículo

Para este estudio se ha utilizado un tractor agrícola New Holland 7630, como se muestra en la Figura 8. Seleccionado por la amplia utilización en la región. Este tractor, de origen estadounidense, está equipado con un motor diésel turbocargado 4500 cm³ con inyección directa de tipo mecánico, y una transmisión manual mecánica 16x4, lo que hace adecuado para diversas labores agrícolas.

Figura 8. Tractor New Holland 7630



(Autoría propia)

A continuación, en la Tabla 9. Se detallan las especificaciones técnicas correspondientes al tractor agrícola.

Tabla 9. Características técnicas New Holland 7630

Dato	Descripción
Marca	New Holland
Modelo	7630
Largo/Ancho/Alto	4370 mm/2248 mm/2695 mm
Distancia entre ejes	2620 mm
Año	2012

Motor	4 cilindros en línea
Tipo de combustible	Diésel
Tipo de inyección de combustible	Inyección Directa mecánica
Transmisión	Manual – Dual Power 16x4
Cilindrada	4500 cm ³
Potencia máxima indicada	110 cv a 2200 rpm (81 kW)
Par máximo indicado	428 Nm a 1400 rpm
Tara	3886 kg

Tomado de: New Holland, Tractor Serie 30 (2024) [56].

3.2 Determinación de variables de estudio

Para estimar el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en un tractor agrícola New Holland 7630, el cual no dispone de una red CAN ni de conector de diagnóstico. Debido a estas limitaciones tecnológicas, se han seleccionado variables provenientes de sensores externos instalados que se conectan directamente al módulo CANmod.input para su registro mediante el dispositivo CANedge2.. Estas se agrupan en tres categorías: variables cinemáticas, modos de trabajo, variables de operación del motor y parámetros de rendimiento.

3.2.1 Variables cinemáticas

Las variables cinemáticas describen el desplazamiento del tractor sobre el terreno, utilizando un módulo GPS externo, vinculado al dispositivo recopilador CANedge2. Estas variables permiten conocer el movimiento dinámico del tractor, incluyendo parámetros como la posición, velocidad y altitud del trabajo. A continuación, en la Tabla 10, se presentan las variables cinemáticas que se toman en cuenta.

Tabla 10. Variables cinemáticas

Variable	Unidad
Tiempo	s
Velocidad instantánea	km/h
Aceleración	m/s ²
Posición	°
Altitud	m.s.n.m
Distancia recorrida	m
Pendiente del terreno	%

3.2.2 Modos de trabajo

En la Tabla 11, se definieron modos de trabajo basados en observaciones de campo agrícola. Estos modos de trabajo se relacionan directamente con la carga del tractor, los implementos y su interacción con el terreno. Además, se instaló un sensor que permitió determinar el estado de trabajo activo (arando), maniobra, transporte y modo pasivo (ralentí).

Tabla 11. *Modos de trabajo del tractor*

Modos de Trabajo	Criterio Operativo
Ralentí	Motor encendido sin desplazamiento ni carga externa.
Transporte	Movimientos en carretera sin uso de implementos.
Maniobra	Movimientos dentro del terreno sin uso de implementos, giros en cabecera.
Trabajo pesado	Uso de implementos de alta demanda energética, cuando el tractor está arando.

3.2.3 Variables Operacionales de motor

Las variables disponibles del motor incluyen: revoluciones por minuto (RPM), registradas por implementos del recopilador de datos; la posición de la rastra, determinada por un sensor que indica si esta se encuentra en posición de trabajo (abajo) o levantada. En la Tabla 12 se presentan estas variables. Todas fueron conectadas directamente al módulo CANmod.input, que permitió su digitalización y registro a través del CANedge2.

Tabla 12. *Variables disponibles del tractor*

Variable	Unidad
Revoluciones por minuto RPM	rev/min
Flujo instantáneo de combustible	L/h
Estado de operación	arado/no arado

3.2.4 Parámetros de rendimiento a nivel de motor y vehículo

Para estimar el consumo de combustible y emisiones, se consideraron los parámetros mostrados en la Tabla 13. Estos parámetros se obtienen a partir de variables registradas del motor y el

vehículo, relacionadas en función del tipo de operación realizada por el vehículo (ralentí, arado, sin arado).

Tabla 13. *Parámetros estimados de rendimiento*

Parámetro	Unidad
Consumo promedio de combustible estimado	L/h
Factor de emisión de CO ₂	kg CO ₂ /h
Consumo específico estimado	g/kWh

3.3 Selección e instalación de equipos y sensores

El proceso de adquisición de datos en maquinaria agrícola convencional representa un desafío técnico cuando el equipo no dispone de una red de comunicación integrada o conectores de diagnóstico estandarizados. Por ello, para esta investigación se diseñó red CAN bus externa, capaz de utilizar señales analógicas y digitales para realizar el análisis.

Al no poseer un conector de diagnóstico, ni red CAN, se seleccionó un sistema de adquisición de datos compuesto por el CANedge2 y el módulo de entrada analógica CANmod.input. Este módulo permite ingresar señales analógicas y convertirlas al protocolo CAN para almacenar en una memoria SD. Este sistema debe garantizar el registro tanto de las variables cinemáticas del tractor como de las principales variables de operación del motor necesarias para estimar el consumo de combustible y emisiones.

Cabe destacar que la frecuencia de registro debe ser de al menos 1 Hz (una medición por segundo) para asegurar una captura precisa y continua de las variables cinemáticas y de operación del tracto, especialmente durante los cambios que se producen en las distintas fases de trabajo.

Se seleccionó el recopilador de datos CANedge2 para llevar a cabo el almacenamiento de las señales, junto con el módulo CANmod.input encargado de convertir señales analógicas compatibles con el protocolo CAN. En el tractor se instalaron sensores externos, entre ellos dos flujómetros DFM ACAN 100 ubicados en las líneas de suministro y retorno de combustible, con el fin de medir el consumo neto. También se integró un interruptor eléctrico utilizado para identificar el estado de la rastra, es decir, cuándo el tractor se encuentra en modo de trabajo activo, un sensor de RPM para determinar el régimen de operación del motor y estimar su potencia,. La conexión de estos dispositivos se realizó mediante cables DB9, específicos para señales de red CAN. Los datos obtenidos se registran en formato MDF4.

En la Tabla 14 se muestran los diferentes materiales y equipos que fueron utilizados para la obtención de datos del tractor agrícola.

Tabla 14. *Equipos y materiales utilizados*

<i>Tipo de variable</i>	<i>Componente</i>	<i>Función</i>
Variables cinemáticas y geográficas	CANedge2	Registrar posición geográfica (GNSS), velocidad, altitud y distancia.
Variables de operación del motor y estado	Módulo CANmod.input	Medición del régimen del motor (RPM) Identificación del estado operativo.
Variables de consumo de combustible	Flujómetro DFM ACAN 100	Medición diferencial de flujo (entrada y retorno).

3.3.1 *Recopilador de datos CAN Edge 2*

En la Figura 9 se muestra un recopilador de datos denominado CAN Edge 2. Este dispositivo permite la recolección de información proveniente de los sensores del vehículo a través de redes CAN y LIN. Cuenta con dos puertos de tipo DB9, mediante los cuales captura los datos, que luego son almacenados en una tarjeta microSD. Además, el CAN Edge 2 es compatible con software gratuito y de código abierto, lo que facilita su configuración y personalización sin restricciones de licencia.

Figura 9. *Recopilador de datos CAN Edge 2*



Tomado de: CSS Electronics, Canedge2 x 2CAN bus data logger (2023) [57].

El dispositivo recopilador de datos CAN Edge2 cuenta con varias características técnicas relevantes que se detallan en la Tabla 15. Estas especificaciones permiten comprender de mejor manera su funcionamiento, tanto desde el punto eléctrico: rango de voltaje de operación y consumo eléctrico; como físico: dimensiones para instalación en espacios reducidos. Además, características de almacenamiento, destacando el registro de datos en tarjetas microSD.

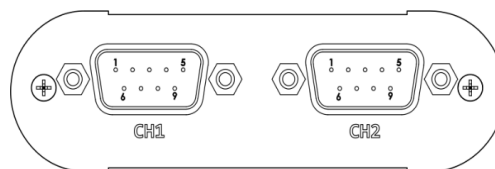
Tabla 15. Especificaciones técnicas CAN Edge2

	Característica	Descripción
General	Origen	Dinamarca
	Peso	100 gramos
	Dimensionamiento	75 x 47 x 20 mm
	Temperatura	Temperatura de funcionamiento: -25 °C a +70 °C
	Software	Gratuito y de código abierto
Conexión	Canales	2 canales CAN compatibles con CAN – FD y también 2 canales LIN
	Estándares	ISO 11898 (hasta 1 Mbit/s) y Bosch CAN FD (hasta 4 Mbit/s)
Almacenamiento	Tarjeta SD	Tarjeta extraíble de 8 GB hasta 32 GB.
	Formato de archivo	Archivos MDF4
Eléctrico	Entrada de voltaje	Se puede alimentar de +7 V a +32 V de CC.
	Consumo de energía	<1 W
	Salida de energía configurable	El canal 2 puede suministrar 5 V a módulos integrados.
	Protección	Protección de inversión de voltaje

Tomado de: CSS Electronics, CANedge2: 2x CAN Bus Data Logger (2023) [58].

Es fundamental contar con un conocimiento adecuado sobre los conectores del dispositivo CAN Edge2, en especial a lo que respecta a la asignación de los pines de conexión en los canales CH1 y CH2. Una comprensión clara de los conectores garantiza una correcta instalación del equipo, además, evita posibles daños en el recopilador de datos y en dispositivos conectados en el mismo. A continuación, en la Figura 10 y Tabla 16 se detalla la configuración y la asignación de los pines de los canales del dispositivo.

Figura 10. Configuración de pines del CAN Edge2



Tomado de: CSS Electronics, Connectors Canedge2 (2023) [59].

Tabla 16. Asignación de pines del CAN Edge2

Pin #	Canal 1 (CH1)	Canal 2 (CH2)
1	NC	5V (Salida)
2	CAN 1 L	CAN 2 L
3	GND	GND

4	LIN Data 1	LIN Data 2
5	NC	NC
6	GND (opcional)	GND (opcional)
7	CAN 1 H	CAN 2 H
8	NC	NC
9	Suministro & VBAT de LIN1	VBAT de LIN2

Tomado de CSS Electronics, Connectors Canedge2 (2023) [59].

3.3.2 *Flujómetro de combustible DFM ACAN 100*

El flujómetro de combustible DFM ACAN 100 es un elemento que se utilizó para realizar mediciones precisas de consumo de combustible en las líneas de suministro y retorno del motor del vehículo. A continuación, en la Figura 11 se muestra el flujómetro que permite transmitir datos en tiempo real por medio de una red de comunicación, lo que permite su integración con sistema de monitoreo y adquisición de datos. Además, las características técnicas principales de los modelos utilizados se pueden observar en la Tabla 17.

Figura 11. *Flujómetro de combustible DFM ACAN 100*



Tomado de: Technoton, medidor de flujo de combustible DFM ACAN 100 (2025) [60].

Tabla 17. *Características técnicas Flujómetro DFM ACAN 100*

Característica	Descripción
Rosca de conexión	M14 x 1.5
Presión máxima	25 bares
Viscosidad cinemática del líquido medido	1,5 a 6 mm ² /s
Flujo de combustible	1,0 a 100 l/h
Error de medición	<1
Protocolo de transmisión de datos	J1939 y NMEA 2000
Velocidad de datos kbits/s	100, 125, 250, 500 y 1000

Tomado de: Technoton, medidor de flujo de combustible DFM ACAN 100 (2025) [60].

3.3.3 Módulo CANmod.Input

Es un dispositivo que se utiliza comúnmente como complemento del dispositivo CAN Edge2. CANmod.input, como se muestra en la Figura 12, admite 8 canales de entrada compatibles con sensores analógicos, digitales y de tipo pulso. Cada canal muestrea la señal del sensor conectado y puede transmitir la información a través del bus CAN. Los datos registrados pueden ser decodificados mediante archivos DBC (Database CAN), los cuales permiten convertir datos CAN a valores comprensibles. Las características principales del módulo se presentan en la Tabla 18.

Figura 12. Módulo CANmod.input



Tomado de: CSS Electroncis, CANmod.input: 8 x Analog/Digital/Pulse to CAN Bus Converter (2023) [61].

Tabla 18. Especificaciones técnicas CANmod.input

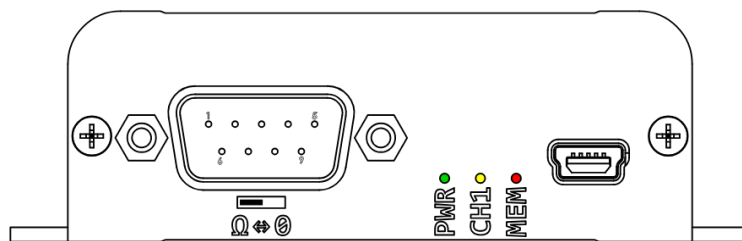
General	Origen	Dinamarca
	Peso	70 gramos
	Dimensionamiento	65 x 48 x 24 mm
	Temperatura	Temperatura de funcionamiento: -25 °C a +70 °C
Conexión	Canales	Admite 8 canales de entrada
	Tipo de señales	Analógica, digital y de pulso.
	Estándar	ISO 11898: Compatible con CAN
Eléctrico	Alimentación	+5 V a +26 V CC a través del conector DB9 (pin 1 o pin 9)
		A través de mini USB
	Consumo	<1 W

Tomado de: CSS Electroncis, CANmod.input: 8 x Analog/Digital/Pulse to CAN Bus Converter (2023) [61].

Para lograr un acoplamiento adecuado entre el dispositivo CANmod.input y el recopilador de datos CAN Edge2, es importante comprender la configuración y la disposición de los pines de conexión del dispositivo. Contar con esta información es fundamental para asegurar el funcionamiento correcto y, al mismo tiempo, evitar errores de conexión y daños en los dispositivos a utilizar.

En la parte frontal del dispositivo, como se observa en la Figura 13, se encuentra con una entrada que utiliza un conector DB9 para la alimentación. Además, incorpora un conector mini-USB que permite realizar tareas de configuración, transmisión de datos y actualización del firmware. La disposición de pines se encuentra en la Tabla 19.

Figura 13. Conector frontal CANmod.input



Tomado de: CSS Electronics, Connector — CANmod.input (2023) [62].

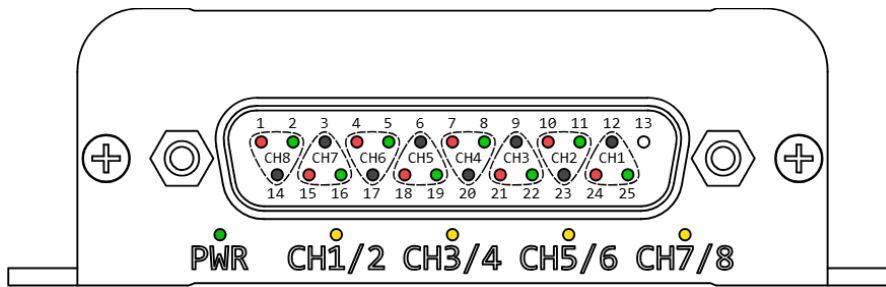
Tabla 19. Disposición de pines conector frontal CANmod.input

Pin #	Conector DB9
1	Alimentación (5 V)
2	CAN 1 L
3	GND
4	NC
5	NC
6	GND (opcional)
7	CAN 1 H
8	NC
9	Alimentación (5-24 V)

Tomado de: CSS Electronics, Connector — CANmod.input (2023) [62].

En la parte posterior del dispositivo, se encuentra una entrada con conector DB25 compartido el cual proporciona acceso a ocho canales de entrada. Los pines de cada están organizados en forma triangular, como se muestra en la Figura 14. La codificación de colores es la siguiente: rojo para la salida de señal de excitación positiva, negro para la referencia negativa común (tierra compartida), verde para la señal de entrada. Cabe destacar que el pin 13 no está conectado.

Figura 14. Conector posterior CANmod.input



Tomado de: CSS Electronics, Connector — CANmod.input (2023) [62].

3.3.4 Módulo CANmod.gps

Este módulo GPS se utilizó para determinar la posición geográfica mediante su antena de posicionamiento digital (GNSS, por sus siglas en inglés) y datos inerciales obtenidos a través de un acelerómetro y un giroscopio. Posteriormente, transmite información a través del bus CAN. Es un dispositivo complementario al recopilador de datos CANedge2. El módulo GPS se muestra en la Figura 15, y sus principales características se detallan en la Tabla 20.

Figura 15. Módulo CANmod.gps



Tomado de: CSS Electronics, CANmod.gps (2023) [63].

Tabla 20. Especificaciones técnicas del módulo CANmod.gps

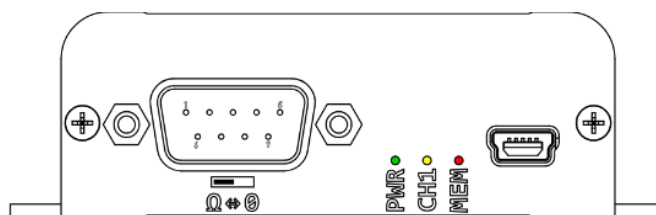
Característica	Descripción
Dimensionamiento	65 x 48 x 24 mm - 70 gramos
Medición de datos	Posición, velocidad, altitud, tiempo, orientación y distancia
Sistemas de navegación GNSS	GPS (EE. UU.), Galileo (Europa), BeiDou (China), GLONASS (Rusia)

Precisión	Posición: 2.5 m Inclinación: 1 grado Velocidad: 0.05 m/s
Canales	1 canal CAN
Estándar	ISO 11898: Compatible con CAN (hasta 1 Mbit/s)
Tasa de bits	Entre 5K a 1M de bits
Alimentación eléctrica	+5 V a +24 V CC a través del conector DB9 (pin 1 o pin 9)
Consumo de energía	1 W

Tomado de: CSS Electronics, CANmod.gps (2023) [63].

El CANmod.gps cuenta con un conector DB9 para su alimentación eléctrica. Además, incorpora un puerto mini-USB que permite su configuración, transmisión de datos y actualización de firmware. En la Figura 16 se muestra el conector frontal del módulo, mientras que en la Tabla 21 se detalla la disposición de los pines de conexión.

Figura 16. Conector frontal CANmod.gps



Tomado de: CSS Electronics, CANmod.gps (2023) [63].

Tabla 21. Disposición de pines CANmod.gps

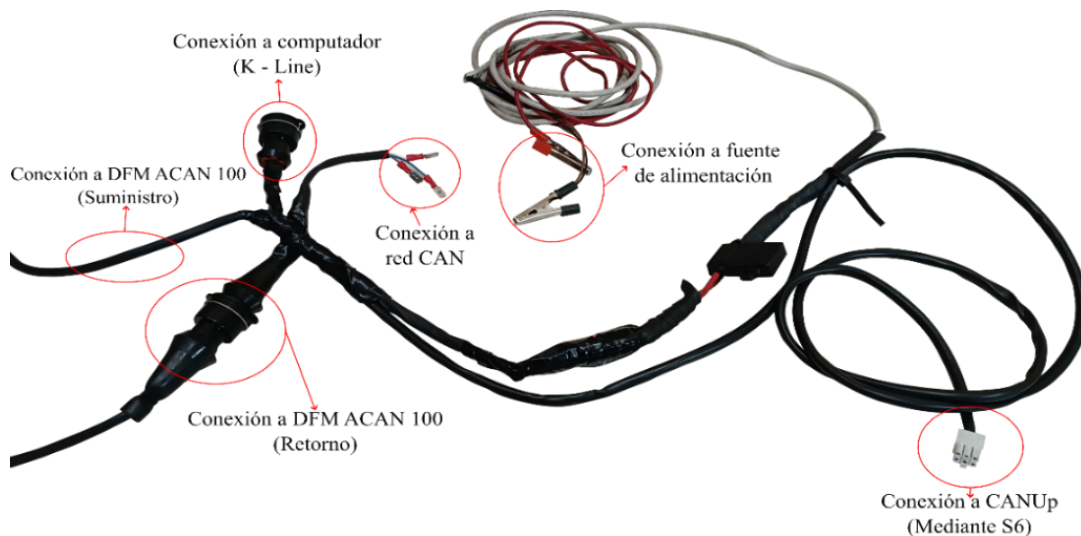
Pin #	Conector DB9
1	Alimentación (5V)
2	CAN 1 L
3	GND
4	NA
5	NA
6	GND (Opcional)
7	CAN 1 H
8	NA
9	Alimentación (5-24V)

Tomado de: CSS Electronics, CANmod.gps (2023) [63].

3.3.5 Cable de comunicación de Flujómetros DFM ACAN 100

Como se observa en la Figura 17, se desarrolló un cable con el objetivo de integrar los flujómetros a la red CAN del dispositivo CANEdge2, permitiendo la comunicación y alimentación de flujómetros. Asimismo, se incorporó tres puertos para la gestión de datos: una interfaz de diagnóstico mediante K – Line, conexión a red CAN y conexión a CANUp bajo protocolo S6.

Figura 17. Cable de conexión común



Tomado de: Arias D, Análisis del consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes (2025) [64].

3.4 Pruebas piloto y configuración de dispositivos

Se llevaron a cabo pruebas experimentales para verificar las conexiones correctas de los dispositivos, con el objetivo de registrar los datos de operación del tractor agrícola en condiciones reales de trabajo. Se determinó que la duración promedio para identificar los distintos modos de operación del tractor, como arado con rastra, transporte, maniobras y ralentí es de aproximadamente 150 minutos. Esto permitió obtener datos representativos en diferentes niveles de carga y regímenes del motor.

3.4.1 Pruebas de Comunicación CAN: CanEdge2, CANmod.input, Flujómetros de combustible y Sensores externos

Se realizaron pruebas de comunicación mediante el protocolo CAN para verificar el correcto funcionamiento del recopilador de datos CANedge2, el módulo de entrada CANmod.input, los

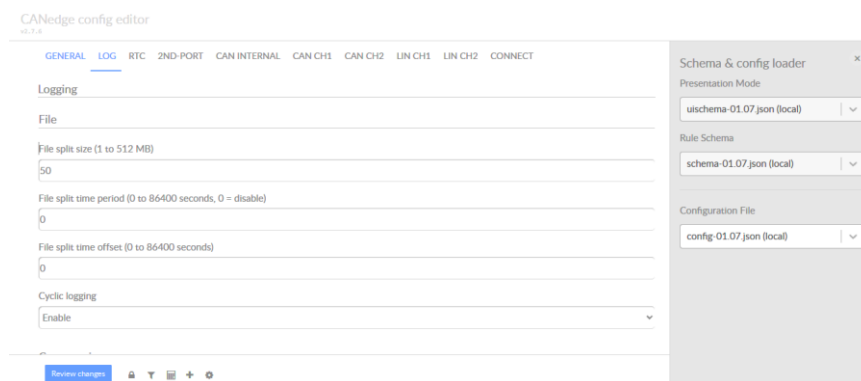
flujómetros de combustible (tanto de suministro como de retorno) y los sensores externos. El objetivo fue validar la adecuada conexión, comunicación, sincronización y almacenamiento de datos entre los dispositivos.

Igualmente, se comprobó que el interruptor que determina la posición de la rastra y la señal para determinar las RPM del motor fueran correctamente detectados por el CANmod.input, convertidos en señales CAN y transmitidos de forma estable al CANedge2.

3.4.2 Configuración de CANedge2 + CANmod.input

Para establecer el enlace entre los módulos, se utilizó la herramienta de configuración proporcionada por CSS Electronics, específicamente para editar el archivo “config.json” del CANedge2. En este archivo se define la frecuencia de muestreo, se habilita el canal CH1 del bus CAN y se configuran los parámetros necesarios para garantizar recepción y sincronización de datos entre los dispositivos. El CANmod.input fue conectado a este canal, permitiendo que el CANedge2 registre las señales del módulo de entrada. La interfaz de esta herramienta y su uso para la configuración se detallan en la Figura 18.

Figura 18. Herramienta de configuración CSS Electronics



Tomado de: CSS Electronics, CANedge config editor (2025) [65].

En la pestaña LOG, no se modificó los parámetros, cada archivo de registro tiene asignado 50 MB, compresión de datos desactivada, y el ciclado automático de archivos habilitado.

Para la pestaña RTC (Real – Time Clock), se siguieron las recomendaciones del manual del CANmod.gps. Se configuró la zona horaria correspondiente a Ecuador (UTC-5). En la sección Channel, se seleccionó el CAN 1, manteniendo sus configuraciones por defecto. Asimismo, se configuraron las opciones Time Valid Signal y Time Value Signal según los valores indicados por CSS Electronics en su manual, como se observa en la Tabla 22.

Tabla 22. *Valores predeterminados Time Valid Signal y Time Value Signal*

Señal	Orden de bytes	Posición	Longitud	Factor	Desplazamiento
Time Valid Signal	Intel	1	1	1	0
Time Value Signal	Intel	8	40	0.001	1577840400

Tomado de: CSS Electronics, Configuration Time Real Clock (2025) [66].

2ND Port y CAN Internal no se utilizaron, ya que no se llevaron a cabo funciones especiales en esos canales. En CAN CH1, se activó la recepción de datos, utilizando este canal para conectar el CANmod.input. La tasa de bits se ajustó a 500kbit/s, correspondiente a la velocidad de transmisión de ambos dispositivos. En la sección de *Transmit messages* se dejó vacía, ya que el CANedge2 solo actúa como receptor de los mensajes enviados por los módulos.

La configuración de la pestaña CAN CH2 fue similar a la de CAN CH1, con la excepción de la tasa de bits, que se estableció en 250 Kbit/s, de acuerdo con el protocolo J1939 empleados por los flujómetros.

Por último, las pestañas LIN CH1, LIN CH2 y Connect no fueron utilizadas, debido a que no se realizaron trabajos especiales que requieran dichas interfaces.

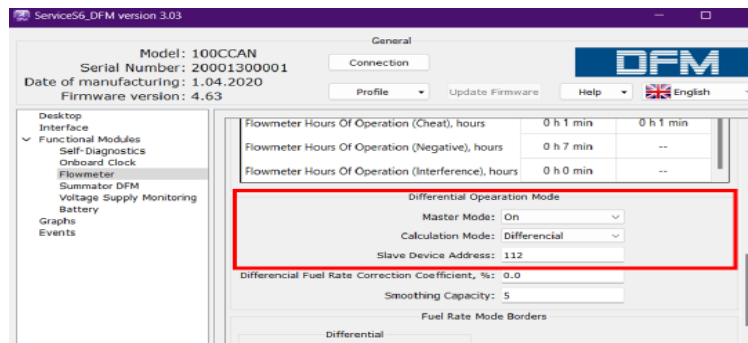
3.4.3 Configuración de los flujómetros

Para establecer la comunicación entre los flujómetros y un computador, se utilizó un conector S6, el cual permite el acceso a la red digital de los dispositivos mediante el protocolo K-Line (ISO 14230).

La configuración para el modo de operación de los flujómetros se realizó a través del software Service S6 DFM, disponible en el sitio web de Technoton. Con este programa, se seleccionó el modo de medición diferencial, en el cual un flujómetro mide el flujo de combustible en la línea de suministro y el otro en la línea de retorno, permitiendo así calcular el consumo neto de combustible, como se muestra en la Figura 19.

Durante el proceso, se asignaron direcciones S6 únicas a cada flujómetro. Al dispositivo instalado en la línea de suministro (denominado *Master*) se le asignó la dirección 112, mientras que al flujómetro ubicado en la línea de retorno (denominado *Slave*) se le asignó la dirección 113. Estas direcciones fueron configuradas en la sección “*Funcional Modules - Flowmeter*” del software, garantizando una configuración adecuada entre ambos dispositivos dentro del sistema de medición.

Figura 19. Software Service S6 DFM



(Autoría propia)

3.4.3.1 Integración de flujómetros a través de la red CAN

Para lograr la sincronización entre los datos de posición y movimiento obtenidos mediante el GPS y la información de consumo de combustible proporcionada por los flujómetros, se utilizó el protocolo SAE J1939, que corresponde al modo de operación predeterminado. Este protocolo permitió la transmisión de datos a través de la red CAN, facilitando así la integración directa con el recopilador CANedge2.

Los mensajes CAN generados por los flujómetros fueron transmitidos a una frecuencia de 1 HZ (cada 1000 milisegundos), según lo especificado en el sitio web de Technoton, como se puede observar en la Figura 20, lo que garantiza una frecuencia de muestreo adecuada para el análisis.

Figura 20. PGN de flujómetro proporcionado por Technoton

PGN 62981 Flowmeter. Parameters

Transmission Repetition Rate:	1000 ms
Data Length:	8
Default Priority:	6
Output PGN List	62981 (0xF605)
Group:	56

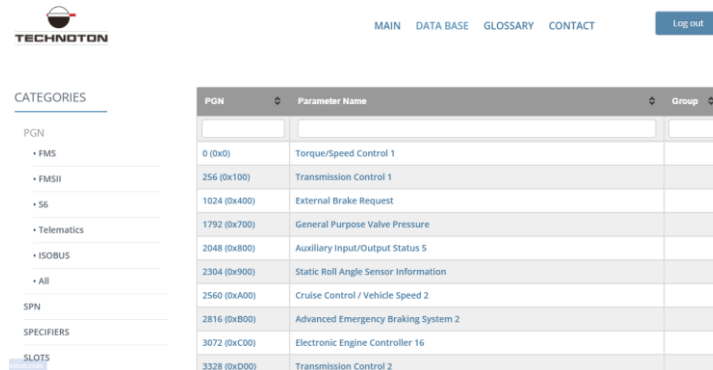
Tomado de: Technoton, PGN 62981 Data base Technoton (2025) [67].

En la operación de los flujómetros bajo configuración diferencial, solo datos no se transmiten de manera aislada, sino en estructuras conocidas como PGN (Parameter Group Number), que corresponden al protocolo SAE J1939 utilizado por estos dispositivos.

Cada PGN incluye valores relacionados con el combustible, los cuales están identificados mediante un código específico llamado SPN (Suspect Parameter Number). Los SPN representan valores físicos como caudal, volumen o temperatura, y para interpretarlos correctamente se necesita una ecuación de decodificación [60].

La descripción de los SPN se obtuvo desde la base de datos S6 proporcionada por Technoton, una herramienta que permite consultar fácilmente los PGN y sus respectivos SPN. Como se puede apreciar en la Figura 21, esta base de datos facilita la comprensión de la estructura y el significado de los datos transmitidos por los flujómetros en tiempo real.

Figura 21. Base de datos de Technoton



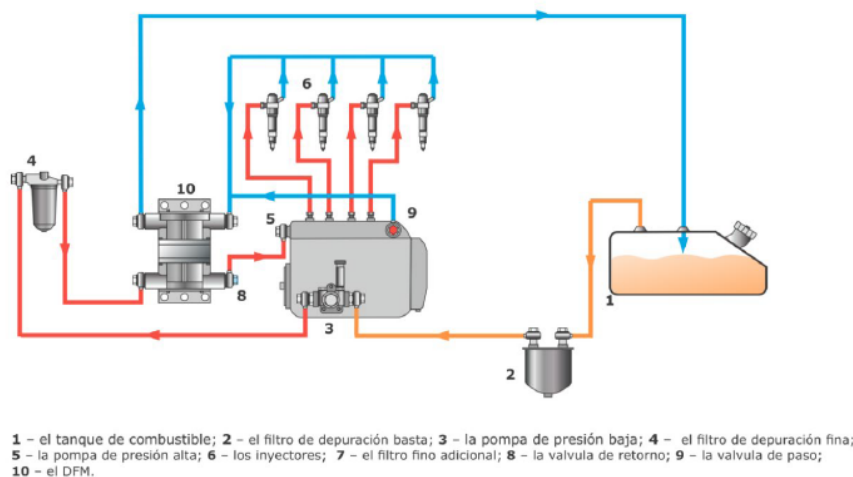
PGN	Parameter Name	Group
0 (0x0)	Torque/Speed Control 1	
256 (0x100)	Transmission Control 1	
1024 (0x400)	External Brake Request	
1792 (0x700)	General Purpose Valve Pressure	
2048 (0x800)	Auxiliary Input/Output Status 5	
2304 (0x900)	Static Roll Angle Sensor Information	
2560 (0xA00)	Cruise Control / Vehicle Speed 2	
2816 (0xB00)	Advanced Emergency Braking System 2	
3072 (0xC00)	Electronic Engine Controller 16	
3328 (0xD00)	Transmission Control 2	

Tomado de: Technoton, Data base S6 (2025) [67] .

3.4.4 Instalación física de los flujómetros

Los flujómetros se instalaron siguiendo el esquema detallado por el fabricante Technoton, tal como se ilustra en la Figura 22. En esta configuración, se emplearon los 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 baja presión. Por otro lado, el flujómetro de retorno se instaló en la línea de retorno al tanque de combustible. De esta manera, el flujo total de combustible se calculó mediante la diferencia entre el caudal de suministro y el de retorno.

Figura 22. Esquema de instalación "Diferencial"



Tomado de: Technoton, Instalación del DFM D (2025) [68].

Se realizó la correspondiente conexión de los flujómetros en las líneas de suministro y retorno de combustible del tractor, tal como se detalla en la Figura 23. Para garantizar la integridad de los componentes y evitar daños, los dispositivos se ubicaron en la caja de herramientas, aprovechando la proximidad a los conductos de combustible.

Figura 23. *Instalación de flujómetros*

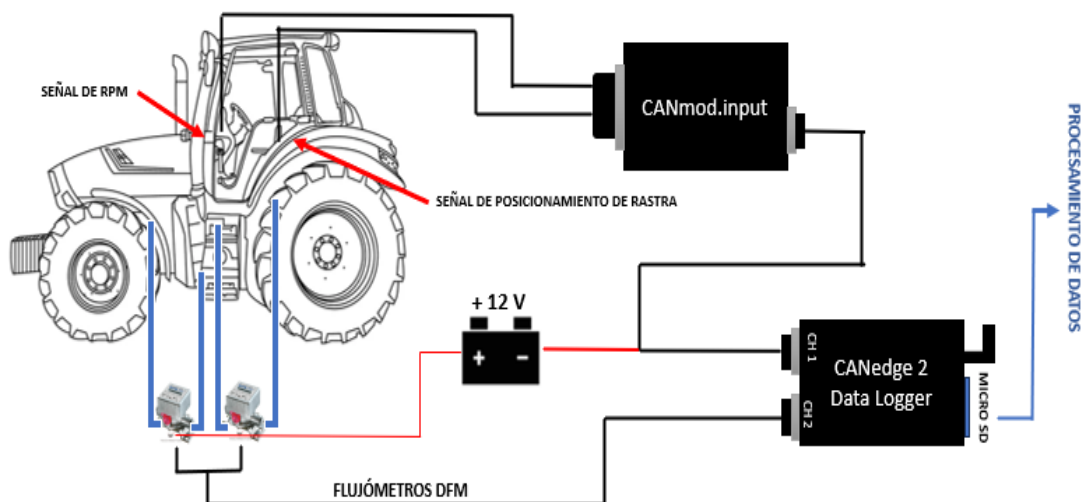


(Autoría propia)

3.4.5 *Instalación de componentes*

Se realizó la conexión final de los equipos para las pruebas experimentales. Como se detalla en la Figura 24, el recopilador CANEdge2 fue alimentado a través del canal 1, se lo hizo desde la batería del tractor. Por otro lado, el canal 2 se destinó exclusivamente a la gestión de datos de los flujómetros, los cuales recibieron alimentación externa desde la misma fuente de energía. La antena GNSS se posicionó en una zona de baja vibración para mejorar la precisión de funcionamiento. Finalmente, todo el sistema se mantuvo en un compartimiento protegido contra la humedad y las partículas, asegurando el cuidado a las condiciones de campo.

Figura 24. *Conexión del sistema de telemetría*



(Autoría propia)

3.5 Campaña experimental

A continuación, se presenta la campaña experimental llevada a cabo para estimar el consumo de combustible y las emisiones de un tractor agrícola mediante un sistema de adquisición de datos. Se detallan las características generales de las pruebas, los tipos de labores agrícolas evaluadas y el protocolo de adquisición de datos.

3.5.1 Características generales de las pruebas

La campaña experimental se llevó a cabo durante el mes de noviembre de 2025, en terrenos agrícolas con características que se describen en la Tabla 23. El estudio abarcó todas las fases operacionales del tractor, desde la puesta en marcha y el calentamiento, el transporte por diferentes tipos de vías, hasta las labores de campo, incluyendo maniobras dentro del mismo. El vehículo de prueba consistió en un tractor New Holland 7630, con adaptación de un sistema de adquisición de datos, compuesto por un dispositivo CANedge2 y un módulo complementario CANmod.input. Esta configuración permitió la integración de sensores externos específicos para la medición de variables requeridas.

Tabla 23. Características del terreno agrícola

Ubicación	San Pedro de Huaca, Carchi, Ecuador
Altitud	2800 – 3000 msnm.
Temperatura	11 °C
Densidad del aire	0.88 kg/m ³
Pendiente	12 % de inclinación media
Humedad	Moderada – Óptima de labranza

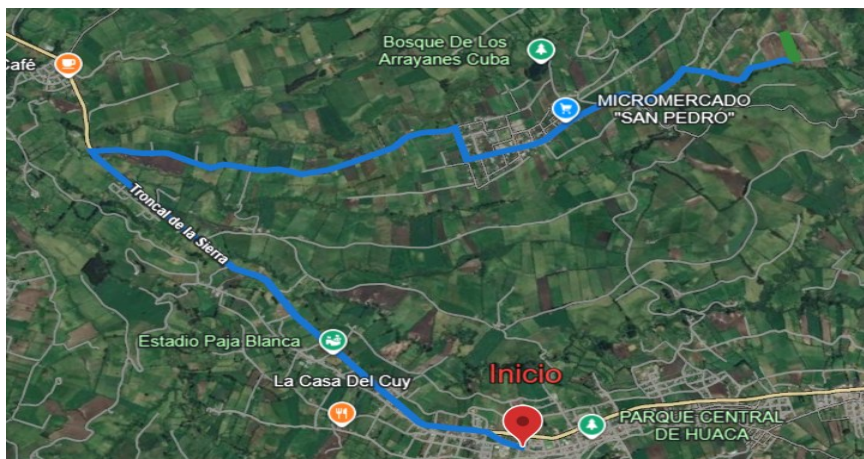
(Autoría propia)

Como se observa en la Tabla 23, las condiciones ambientales en San Pedro de Huaca, caracterizadas por una altitud cercana a los 3000 msnm y una reducida densidad del aire de 0.88 kg/m³, condicionan el desempeño del tractor. Esta disminución de oxígeno, en comparación con el nivel del mar, afecta la eficiencia de combustión, lo que se traduce en un incremento de consumo de combustible. Asimismo, la pendiente media del 12% obliga al tractor a operar en regímenes de operación más elevados para superar la resistencia gravitacional del terreno.

3.5.2 Descripción de la ruta realizada

La jornada de operación del tractor New Holland 7630 inició desde el punto de partida es decir el garaje. El trayecto comprendió la circulación por vía adoquinada antes de incorporarse a la panamericana, donde se desplazó durante aproximadamente una hora. Durante esta etapa, el tractor enfrentó ascensos y descensos como se observa en la Figura 25. La fase de transporte concluyó tras transitar por caminos de tierra antes de llegar al terreno agrícola.

Figura 25. Ruta de traslado del tractor



(Autoría propia)

Una vez en el terreno, se procedió a la fase de arado. Debido a la topografía del terreno con pendientes críticas del 12%, se determinó que realizar el arado en ascenso representaba un riesgo de sobreesfuerzo mecánico del motor y comprometía la seguridad operativa. En consecuencia, el tractor ejecutó el trabajo de arado en un solo sentido, realizando el retorno al punto de inicio mediante maniobras de cabecera por los bordes del terreno, como se observa en la Figura 26.

Figura 26. Ruta de trabajo realizada por el tractor



(Autoría propia)

3.5.3 Descripción de las labores agrícolas evaluadas

Las pruebas incluyeron diferentes condiciones de operación del tractor, representativas de su uso diario en campo agrícola. Se evaluaron los siguientes modos de funcionamiento:

- Ralentí: Estado en el que el tractor permanece encendido a revoluciones mínimas sin desplazamiento ni carga aplicada. Representa tiempos de espera o pausas técnicas durante la jornada.
- Transporte: Desplazamiento del tractor por diferentes vías durante el traslado hacia el lugar de arado. En este modo, el implemento no trabaja.
- Maniobra: Movimientos operativos realizados dentro del terreno, tales como giros de cabecera o desplazamiento sin el implemento accionado.
- Arado: Es la fase de mayor exigencia donde el tractor opera con una rastra conectada. En este modo representa el mayor esfuerzo del motor debido a la alta demanda de trabajo.

Con el objetivo de asegurar la adquisición de datos reales, todas las pruebas se realizaron con el mismo operario manteniendo la misma conducción habitual. Asimismo, las pruebas se desarrollaron bajo condiciones climáticas estables y sin presencia de lluvia, con el fin de asegurar la coherencia de los datos obtenidos.

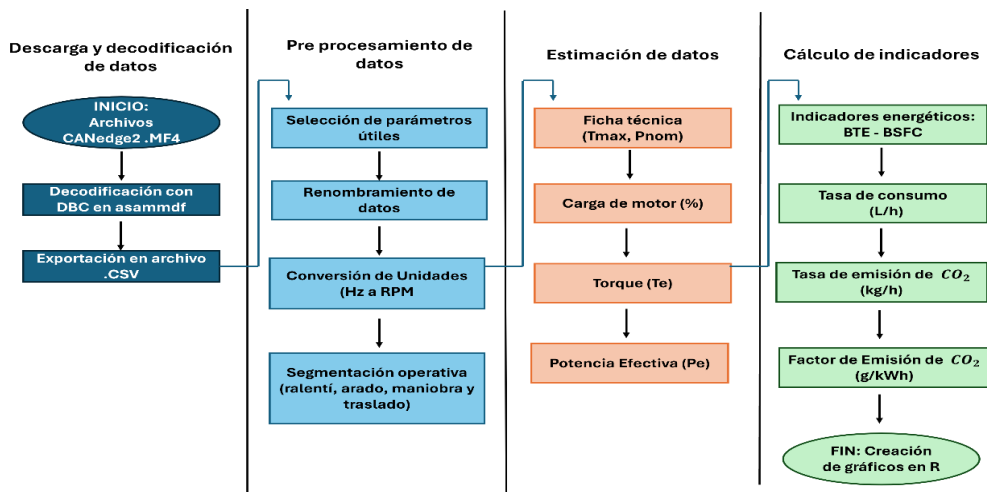
3.5.4 Protocolo de adquisición de datos

El protocolo de adquisición de datos inició con la inspección visual del montaje y la verificación de la conectividad de los dispositivos. Durante la fase experimental, se aseguró la integridad física de los dispositivos. Incluyendo medidas de protección contra vibraciones mecánicas excesivas, humedad y polvo propios del entorno agrícola. Al concluir la jornada de trabajo, se procedió a la extracción física de la tarjeta SD del CANEdge2 para almacenar y asegurar el respaldo de los datos obtenidos.

3.6 Procesamiento y análisis de datos

Una vez finalizada la campaña experimental y obtenidos los archivos de registro mediante el sistema de adquisición, se procedió a la etapa de procesamiento y tratamiento de la información, como se observa en la Figura 27. Para este propósito, se utilizó el lenguaje de programación R, seleccionado por su alta capacidad para gestionar grandes volúmenes de datos. Asimismo, se aprovechó la extensa cantidad de librerías para la ejecución de cálculos y generación de gráficas de alta precisión.

Figura 27. Diagrama de flujo de procesamiento y análisis de datos

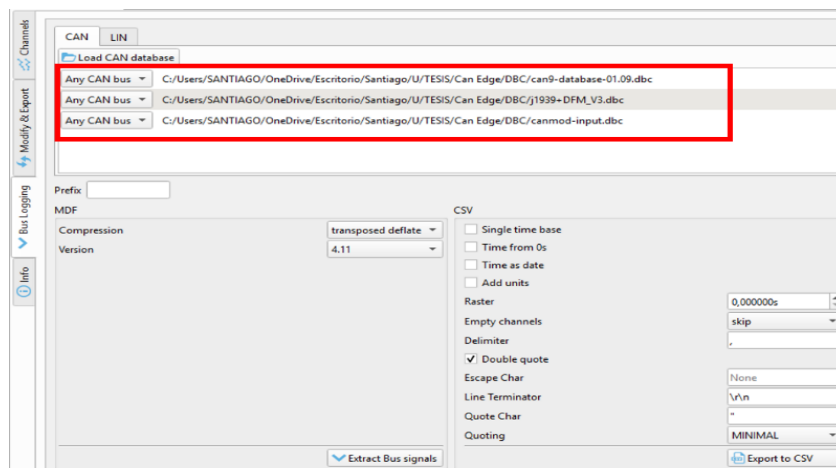


(Autoría propia)

3.6.1 Descarga y decodificación de datos

Los registros obtenidos por el dispositivo CANedge2 fueron almacenados originalmente en archivos de formato MF4. Para la gestión de estos archivos, se empleó la herramienta asammdf, basada en Python. Como se observa en la Figura 28, el proceso de decodificación se realizó mediante el uso de una Base de Datos CAN (DBC).

Figura 28. Interfaz de asammdf



(Autoría propia)

Para este estudio, se configuró una descodificación compuesta por tres archivos DBC específicos, proporcionados por la plataforma CSS Electronics:

- DBC del CANedge2: para la interpretación de señales nativas del compilador.
- DBC del CANmod.input: encargado de traducir las señales analógicas y digitales de los sensores externos.

- DBC de los flujómetros: diseñado para el mapeo preciso de los datos de consumo de combustible.

Este proceso transformó los valores hexadecimales obtenidos en datos de formato de valores separados por comas (CSV), permitiendo una lectura estandarizada para su posterior procesamiento y análisis.

3.6.2 Transformación de señales y segmentación operativa

Tras la obtención de datos en formato CSV, se inició una etapa de preparación mediante el lenguaje R. Este proceso comenzó con la selección de los parámetros útiles para el análisis energético, descartando registros que no aportan al estudio. Durante esta etapa, se renombró las variables que mantenían la nomenclatura original del CANedge2, sustituyendo por términos técnicos facilitando la interpretación de las variables.

Posteriormente, se procedió a la transformación de señales provenientes del módulo CANmod.input. Debido a que estos datos se registraron inicialmente como señales eléctricas, fue necesario convertirlas en magnitudes físicas. Un claro ejemplo, fue la conversión de la señal de frecuencia capturada en Hertz, la cual fue procesada y convertida a valores de revoluciones por minuto (RPM).

Finalmente, con base en las variables de velocidad y régimen del motor, se clasificó la base de datos según la actividad realizada en el campo. Como se observa en la Figura 29, los registros fueron etiquetados en cuatro modos: Ralentí, Transporte, Maniobra y Arado. Esta clasificación permitió organizar los datos de manera más sistemática, lo que facilitó el análisis según su nivel de exigencia para, posteriormente, realizar la comparativa de su consumo y eficiencia energética.

Figura 29. Extracto de código de clasificación según la operación

```
# Identificar y clasificar los estados de operación
datosUtiles <- datosUtiles %>%
  mutate(
    ModoOperacion = case_when(
      # Ralentí: Motor encendido pero tractor detenido
      Velocidad_kmh < 0.2 & RPM > 700 ~ "Ralentí",
      # Labranza: Rastra trabajando (1) a velocidad de campo
      Posicion_Rastra == 1 ~ "Arado",
      # Maniobra: Rastra levantada (0) a baja velocidad
      Velocidad_kmh < 7 & RPM > 600 ~ "Maniobra",
      # Transporte: Traslados por carretera a mayor velocidad
      Velocidad_kmh >= 7 ~ "Transporte",
      # Apagado
      RPM == 0 ~ "Apagado",
      # Otros
      TRUE ~ "Maniobra"
    )
  )
```

(Autoría propia)

3.6.3 Cálculo y estimación de indicadores energéticos y ambientales

Dado que el tractor no cuenta con una red CAN, ni sensores de emisiones integrados, se implementó una metodología de estimación indirecta. Esta estrategia replica los criterios técnicos reportados para maquinaria agrícola en operación real, como el propuesto por Hou et al. (2023) [54]. Ante la dificultad de realizar ensayos en un banco dinamométrico para medir el par y la potencia, estos parámetros fueron estimados a partir del consumo del combustible y el régimen de giro del motor.

La carga de motor se determinó mediante la relación entre el consumo de combustible instantáneo medido y el consumo de combustible máximo teórico. Para establecer este límite superior, se calculó primero el flujo volumétrico (V_f) bajo condiciones de máxima demanda, utilizando la potencia nominal del motor (P), el consumo específico de combustible (BSFC) y la densidad del diésel (ρ), según se describe en la Ecuación 1.

$$V_f(l/h) = \frac{P \text{ (kW)} * BSFC \text{ (g/kWh)}}{\rho \text{ (g/l)}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Para el parámetro de BSFC, se adoptó un valor de 243 g/kWh, el cual corresponde al promedio de los resultados obtenidos por Hou et al. (2023) [54]. Este valor representa el desempeño global del motor en diversas tareas agrícolas (labranza, siembra, transporte y empacado). Aplicando una potencia de 80.9 kW y una densidad de 835 g/l, se obtuvo un consumo máximo teórico de aproximadamente 23 l/h. Finalmente, con el consumo máximo teórico definido, se procedió a calcular el porcentaje de carga teórica del motor mediante la Ecuación 2.

$$\% \text{ carga} = \frac{\text{Consumo Instantáneo (l/h)}}{\text{Consumo Máximo Teórico (l/h)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Debido a que el tractor no cuenta con sensores de torque en tiempo real, se procedió a calcular el Par efectivo (T_e) utilizando la estimación de carga de motor. El cálculo se realizó multiplicando el par máximo (T_{max}) obtenido de la ficha técnica del vehículo, por el factor de carga previamente estimado, como se muestra en la Ecuación 3.

$$T_e(Nm) = T_{max} \text{ (Nm)} * \% \text{ Carga de motor} \quad \text{Ecuación 3}$$

Seguido de esto, se calculó la Potencia Térmica Instantánea (Pt). Esta se obtuvo a partir del flujo másico de combustible (\dot{m}_f) y el poder calorífico (Cp) del diésel, utilizando un valor de 42.7 MJ/kg. El cálculo se realizó mediante la Ecuación 4.

$$P_t(kW) = \dot{m}_f (g/s) * C_p (MJ/kg) \quad \text{Ecuación 4}$$

Posteriormente, como se observa en la Ecuación 5, se calculó la Potencia Efectiva (Pe), a partir del par estimado y el régimen de giro del motor. Esta variable representa la potencia mecánica real entregada por el motor.

$$P_e(kW) = RPM * T_e(Nm) * \frac{2\pi}{60} * \frac{1}{1000} \quad \text{Ecuación 5}$$

La Eficiencia Térmica al Freno (BTE), representando el porcentaje de energía química del combustible que el motor logra convertir en trabajo mecánico. Se calculó mediante la relación de la potencia efectiva y la potencia térmica, como se observa en la Ecuación 6.

$$BTE (\%) = \frac{\text{Potencia Efectiva (kW)}}{\text{Potencia Térmica (kW)}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Por otro lado, el Consumo Específico de Combustible (BSFC) que permite cuantificar la cantidad de combustible requerida para producir una unidad de energía. Se calculó utilizando el consumo másico de combustible para la potencia efectiva, según la Ecuación 7.

$$BSFC (g/kWh) = \frac{\text{Consumo de combustible (g/h)}}{\text{Potencia Efectiva (kW)}} \quad \text{Ecuación 7}$$

En esta sección, se determinan las tasas de emisión de CO₂ y consumos de combustible, así como los factores de emisión para cada modo de operación del tractor. Este análisis permite validar los registros obtenidos comparando con estudios previos en condiciones similares.

A continuación, se calculó la tasa de emisión de dióxido de carbono a partir de la relación entre los átomos de hidrógeno y carbono del combustible. Para ello, se utilizó la fórmula química del diésel C₁₂H₂₆, estableciendo una relación de 2.16. Con este valor, se determinó la cantidad de CO₂ generada por cada unidad másica de combustible quemado. Como se detalla en la Ecuación 8.

$$\frac{kg \text{ de } CO_2}{kg \text{ de Combustible}} = \frac{44}{12 + \frac{H}{C}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para calcular el factor de emisión de CO₂, se relacionó la masa total del CO₂ emitida con la potencia efectiva total entregada por el motor. Se incluyó un factor de conversión para permitir expresar el resultado en (g/kWh), como se observa en la Ecuación 9. Asimismo, se determinó el factor de emisión de CO₂ en relación de la distancia recorrida, como se detalla en la Ecuación 10.

$$FE_{CO_2} \text{ (g/kWh)} = \frac{\text{Masa total del } CO_2 \text{ (g/s)} * 3600}{P_e \text{ (kW)}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$FE_{CO_2} \text{ (g/km)} = \frac{\text{Masa total del } CO_2 \text{ (g)}}{\text{Distancia recorrida (km)}} \quad \text{Ecuación 10}$$

También se calculó el consumo de combustible por unidad de distancia permitiendo cuantificar la demanda energética del motor en función del trayecto realizado. En la Ecuación 11, se detalla el consumo másico por kilómetro, mientras que en la Ecuación 12 se establece el consumo volumétrico a los 100 km recorridos.

$$Consumo_{km} \text{ (g/km)} = \frac{\text{Masa total de combustible consumido (g)}}{\text{Distancia total recorrida (km)}} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$Consumo_{km} \text{ (L/100km)} = \frac{\text{Volumen total de combustible consumido (L)}}{\text{Distancia total recorrida (km)}} \quad \text{Ecuación 12}$$

3.6.4 Creación de gráficos y visualización de datos

Para la representación visual de los resultados, se empleó la librería ggplot2 en el entorno R, lo que permitió transformar las variables procesadas en herramientas de diagnóstico. El primer enfoque se centró en la generación de perfiles topográficos, donde se integraron las variables de elevación (msnm) y gradiente de pendiente. Este método de visualización facilitó la correlación directa entre la topografía del terreno y la demanda energética del tractor, aplicando ajustes de relación de aspecto para garantizar una representación correcta.

Por otro lado, se desarrollaron diagramas de cajas y bigotes y gráficos de barras para evaluar la distribución estadística y los promedios de consumo y emisiones. Estas gráficas permitieron identificar la variabilidad del flujo de combustible y los factores de emisión de CO₂ en cada uno de los cuatro modos operativos definidos, facilitando la comparación con estándares internacionales. Finalmente, todas las figuras fueron exportadas en alta resolución para asegurar la legibilidad de los indicadores críticos, como el consumo horario (L/h) y la eficiencia térmica al freno (BTE).

CAPITULO IV

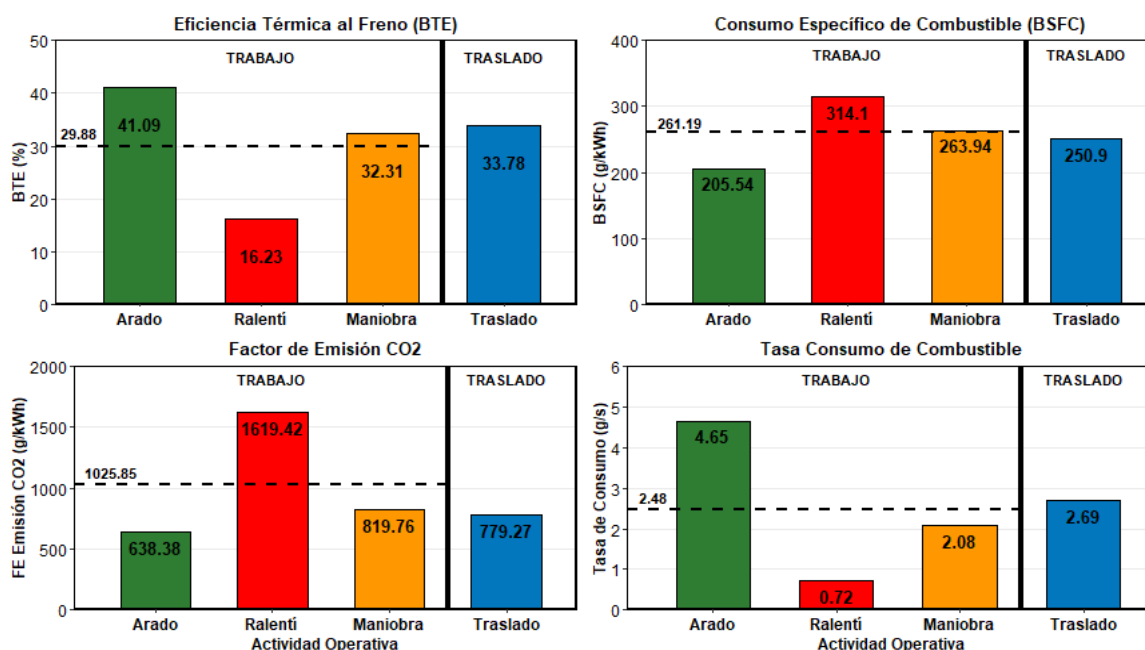
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la investigación, acompañados del correspondiente análisis. En primer lugar, se exponen los resultados generales obtenidos mediante el sistema de recopilación de datos instalado en un tractor New Holland 7630, el cual fue instrumentado con sensores específicos y utilizado en tareas agrícolas, especialmente en arado para futuros cultivos.

4.1 Análisis global de eficiencia y perfil ambiental

En la Figura 30, se caracterizan el desempeño energético y el perfil ambiental del tractor New Holland 7630 mediante el análisis de los indicadores de eficiencia térmica, consumo específico y emisiones de CO₂. Esta representación segmentada permite identificar los regímenes donde el motor alcanza su mayor eficiencia operativa frente a los escenarios de mayor impacto ambiental.

Figura 30. Relación de factores de emisión y consumo por actividad



(Autoría propia)

Como se observa en la imagen Figura 30, la eficiencia térmica al freno (BTE) alcanzó su valor máximo durante la labor de arado con el 41.09%, lo cual coincide con lo expuesto por Hou et al. (2023) [54], quien afirma que la eficiencia es una variable dependiente del factor de carga. Sin embargo al integrar las fases de ralentí y maniobras, la eficiencia promedio de trabajo se reduce significativamente.

Respecto al Consumo Específico de Combustible al Freno, el BSFC promedio registrado en esta investigación (261.19 g/kWh) es un 7.4% mayor en comparación con los niveles reportados por Hou et al. (2023) [54]. Este incremento es consecuencia de la tecnología de inyección, dado que el tractor new Holland 7630 cuenta con un sistema mecánico, a diferencia de la tecnología Common Rail analizada por los autores, la cual permite optimizar la mezcla aire-combustible. Por otro lado, el perfil operativo influyó, debido a los periodos prolongados de ralentí, donde el BSFC se dispara a 314.1 g/kWh afectando el promedio general. Aunque en ralentí la tasa de consumo es mínima (0.72 g/s), la baja potencia efectiva lo convierte en el modo más ineficiente.

Finalmente, el perfil ambiental más crítico lo tiene el modo de ralentí con 1619.42 gCO₂/kWh, casi triplicando las emisiones generadas durante el arado (638.38 gCO₂/kWh). Esto confirma que cuando el tractor está detenido, representa una pérdida económica y un elevado impacto ambiental.

4.2 Caracterización del comportamiento dinámico del motor

En esta sección se analiza la respuesta mecánica y energética del tractor New Holland 7630 frente a las condiciones reales de operación. El comportamiento del motor se evalúa con la interacción del implemento de arado y las irregularidades del relieve. A continuación, se correlacionan las variables topográficas con los indicadores de desempeño para determinar la eficiencia del tractor en cada fase de la jornada.

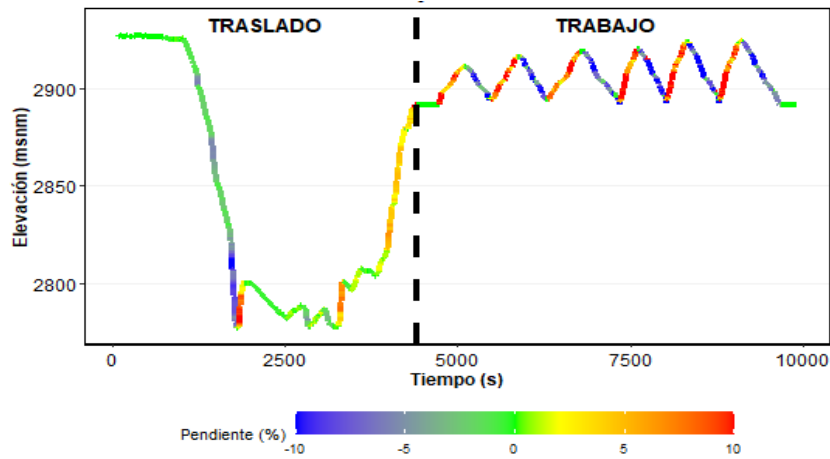
4.2.1 Perfil topográfico y gradiente de pendiente de la jornada

En la Figura 31 se presenta la variación de elevación (msnm) y el gradiente de pendiente (%) a lo largo de la jornada experimental, permitiendo visualizar el perfil topográfico recorrido por el tractor desde el punto de inicio hasta la culminación de la labor.

El trayecto se inicia con un descenso pronunciado a través de la carretera panamericana, con pendientes negativas de hasta -10%. Una vez iniciado el trabajo agrícola, el perfil presenta un patrón oscilatorio característico de los terrenos irregulares, donde los gradientes fluctúan entre 5% y 10%. La presencia de gradientes de pendiente condicionó directamente la estrategia de trabajo, se optó por una maniobra de bordeo perimetral para ejecutar el arado exclusivamente en sentido descendente, garantizando la estabilidad del conjunto y seguridad del operador. Es importante destacar que los tramos identificados con un gradiente positivo registraron

incrementos significativos en el flujo de combustible instantáneo debido a la necesidad de vencer la componente gravitatoria.

Figura 31. Perfil topográfico y gradiente de pendiente de la jornada



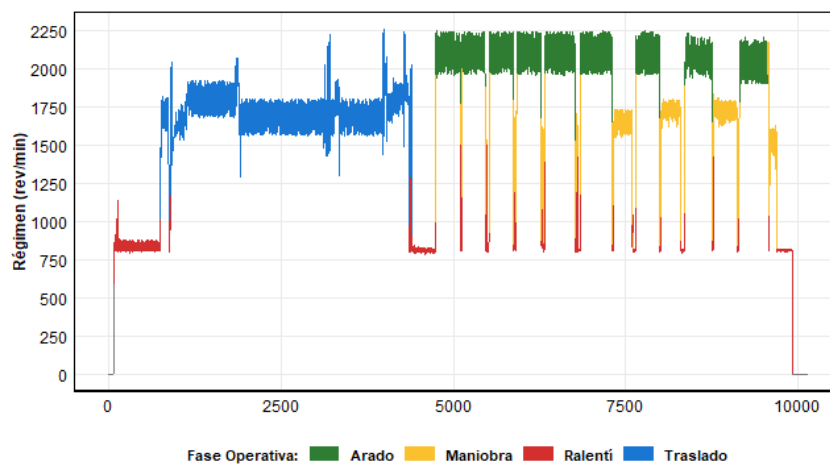
(Autoría propia)

4.2.2 Perfil de régimen de giro (RPM)

En la Figura 32 se presenta la variación de las revoluciones por minuto del motor del tractor New Holland 7630 durante una jornada de trabajo agrícola. El análisis permite distinguir la operación en cuatro fases distintas: ralentí, maniobras, traslado y arado.

Se observa que el régimen del motor presenta constantes variaciones derivadas de aceleraciones y cambios de marcha del operador. Durante la fase arado, se evidencia un incremento de RPM, donde el operador ajusta el régimen del motor siguiendo las especificaciones que recomienda el panel de instrumentos.

Figura 32. Perfil de régimen de giro

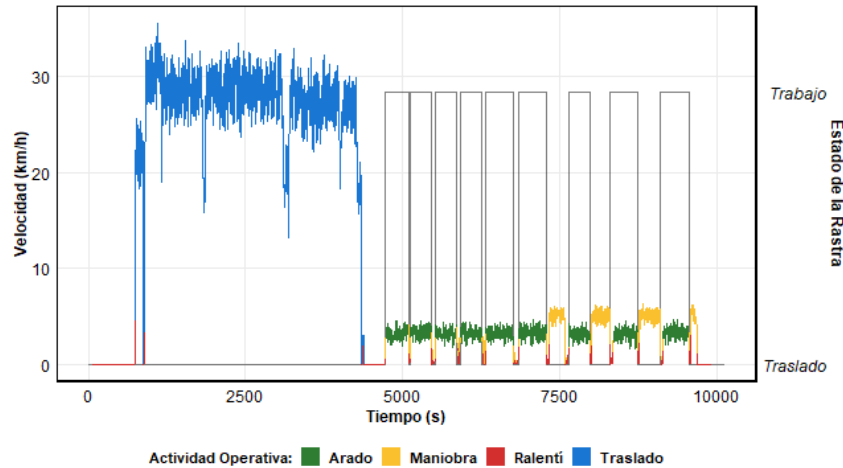


(Autoría propia)

4.2.3 Perfil de velocidad y sincronización del acople agrícola

En la Figura 33 se presenta el perfil de la velocidad, sincronizado con el funcionamiento de la rastra para el arado, permitiendo analizar la velocidad en los modos de operación a lo largo de la jornada.

Figura 33. Perfil de velocidad y sincronización del acople agrícola



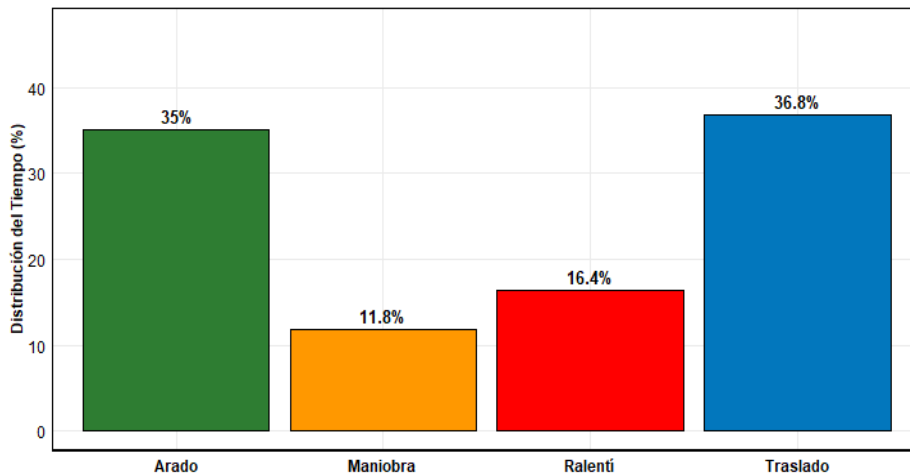
(Autoría propia)

Durante la fase de traslado, se observa que el tractor opera a velocidades elevadas y variables, alcanzando picos de aproximadamente a 28 km/h, estas fluctuaciones son características del desplazamiento por vías irregulares. Por el contrario, en la fase de arado se aprecia reducción de velocidad cercana 3 km/h, priorizando el torque por el trabajo que debe realizar con la rastra implementada. Finalmente, se identifican zonas de maniobra y bordeo perimetral con una velocidad promedio de 5 km/h, incrementando levemente la velocidad, debido al levantamiento del implemento.

4.2.4 Análisis de la distribución del tiempo operativo

La distribución del tiempo por modo de operación, detallada en la Figura 34, revela una igualdad en la medición entre labores de traslado y arado con 36.8% y 35%, respectivamente. En el caso de las maniobras, este tiempo se deriva de los giros necesarios en las cabeceras del terreno para reposicionar e iniciar el arado con un 11.8% del tiempo total, mientras que el ralentí con un 16.4% se concentra principalmente en los periodos de calentamiento inicial, paradas técnicas intermedias y enfriamiento final..

Figura 34. *Porcentaje de tiempo por actividad*



(Autoría propia)

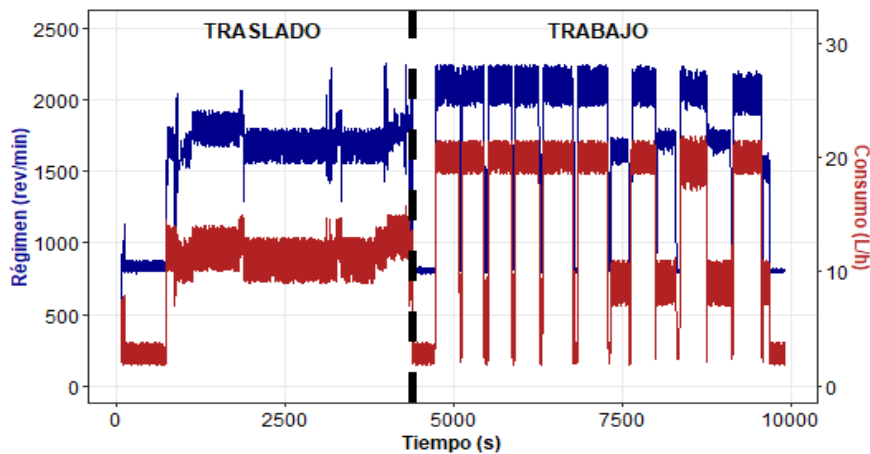
4.3 Caracterización del consumo de combustible y demanda de potencia

La evaluación de la dinámica del consumo y la demanda de potencia permite cuantificar el impacto directo de las diversas tareas agrícolas sobre el gasto de recursos del tractor. Este enfoque caracteriza el perfil operativo del tractor, permitiendo diferenciar con precisión la exigencia de consumo realizado en arado frente a los consumos registrados en las fases de ralentí, maniobra y traslado.

4.3.1 Sincronización entre régimen y flujo de combustible

En la Figura 35 permite evidenciar la relación directa y proporcional entre las RPM y el flujo de combustible, donde los picos superiores a 20 L/h corresponden a la fase de plena carga con el implemento trabajando.

Figura 35. *Sincronización entre régimen de motor y consumo de combustible*



(Autoría propia)

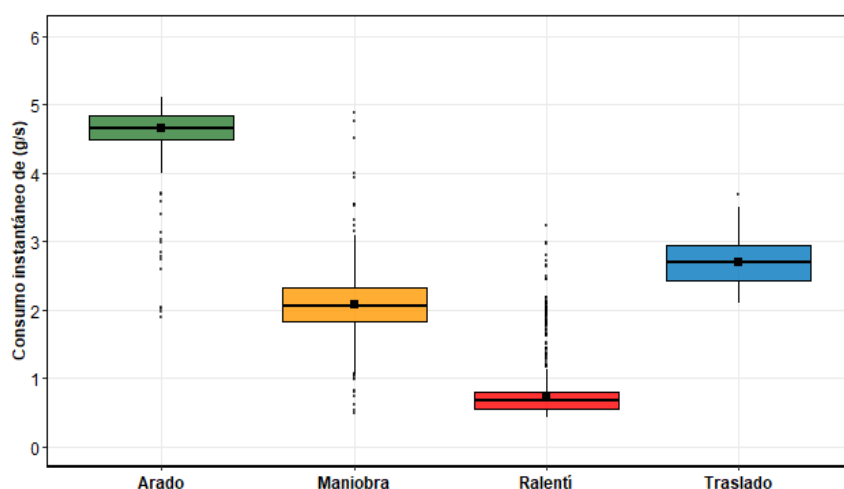
En el primer tramo de traslado, se evidencia un consumo entre 3 y 5 L/h, lo que corresponde a un estado de ralentí del motor, donde el flujo es bajo debido a la mínima exigencia del motor. En el segundo tramo de traslado, el consumo se mantiene estable entre 8 y 14 L/h, reflejando una carga moderada por el desplazamiento en carretera que está realizando, teniendo variaciones que se pueden distinguir fácilmente debido a los cambios de velocidades, cambios de carreteras y pendientes.

La zona principal de trabajo muestra un comportamiento elevado, donde oscila entre 3 L/h y picos por encima de 22 L/h. Este patrón refleja el trabajo de arado con activación y desactivación repetida del implemento. Los picos altos indican momentos en el que el motor se encuentra a plena carga, con la rastra abajo y en plena operación. Los picos bajos representan a los momentos de giro o traslado del tractor sin carga, cuando la rastra se encuentra elevada.

4.3.2 Tasa de consumo de combustible instantáneo

En la Figura 36 se analiza el consumo instantáneo de combustible para cada una de las operaciones realizadas en la jornada, evidenciando una correlación directa entre la carga de trabajo y el consumo de combustible. El modo de arado presenta la tasa más elevada con un promedio de 4.5 g/s, resultado de la exigencia del trabajo. Durante la fase de traslado, se observa un consumo medio de 2.8 g/s, el cual es ligeramente superior al registrado en el modo de maniobra, cuya tasa se sitúa en 2.1 g/s debido a que el desplazamiento se realiza sin la activación del implemento enfrentando las irregularidades del terreno. Finalmente, el modo ralentí registra la tasa mínima de 0.8 g/s.

Figura 36. Tasa de consumo de combustible instantáneo por actividad

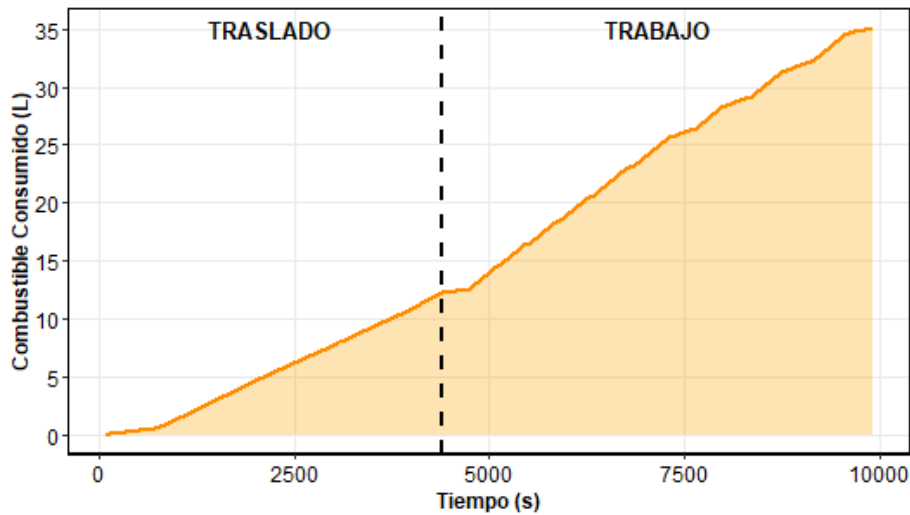


(Autoría propia)

4.3.3 Consumo de combustible acumulado

Como se observa en la Figura 37, el consumo total de combustible registrado para el estudio realizado fue de aproximadamente 35 L. Este valor representa la cantidad total de diésel consumido por el tractor.

Figura 37. Curva de consumo de combustible acumulado



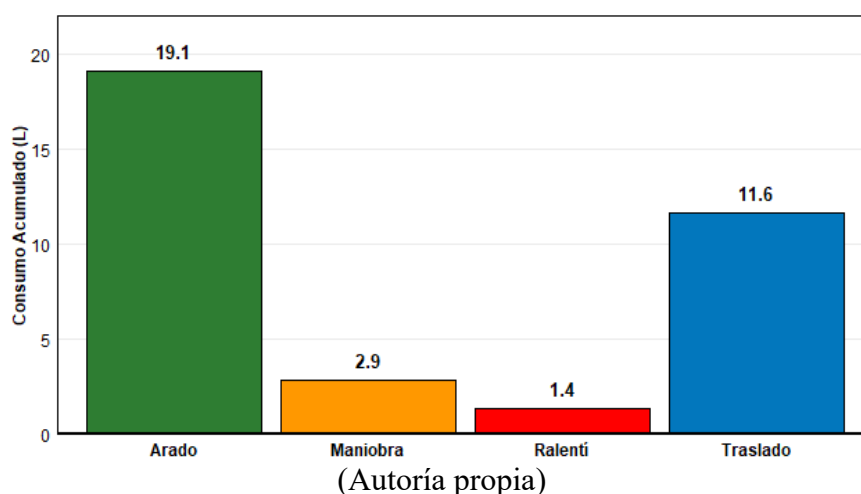
(Autoría propia)

Durante la fase inicial del monitoreo, es decir en el traslado, la pendiente de la curva es menos pronunciada, indicando una tasa de consumo de combustible moderada, debido al desplazamiento del tractor sin carga y a baja velocidad. Posteriormente, en la fase de trabajo, la pendiente es más pronunciada, equivalente a un trabajo más exigente, por ende, una tasa de consumo de combustible más elevada. En la fase final, se existe una estabilización de la curva de consumo acumulado, asociada a la reducción de la carga de trabajo y periodos de ralenti antes de apagar el equipo.

4.3.4 Consumo total de combustible por actividad

La Figura 38, se presenta la distribución del consumo total de combustible, expresado en litros, acumulado durante las distintas fases operativas del tractor a lo largo de una jornada de trabajo experimental. Esta representación permite cuantificar la demanda energética de cada actividad, facilitando el análisis en el costo operativo.

Figura 38. *Consumo total de combustible por actividad*



La fase de arado concentra el mayor consumo de combustible, alcanzando un valor de 19.1 L. Este resultado se alinea con la intensidad del esfuerzo mecánico requerido para traccionar el implemento en contacto con el suelo. En este escenario, el motor trabaja bajo carga constante, lo que incrementa el flujo de combustible de manera sostenida. Esta etapa representa el 50% del gasto total de combustible.

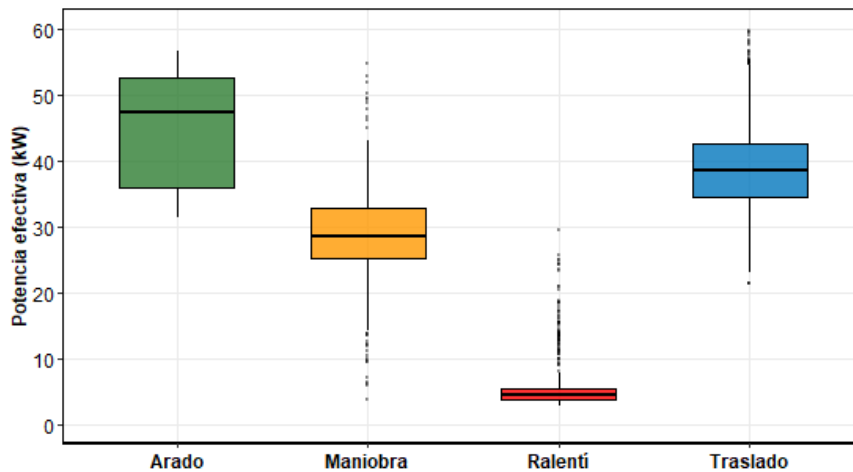
La fase de traslado presenta un consumo moderado, cercanos al 11.6 L. Si bien no implica un esfuerzo demasiado elevado como el trabajo neto, si exigen una respuesta del motor. La fase de maniobra presenta un bajo consumo de aproximadamente 2.9 L, representando a los giros de cabecera.

Mientras el tractor está en ralentí, consume aproximadamente 1.4 L. Aunque el gasto de combustible en estos momentos es reducido, representan oportunidades claras de optimización. Reducir los tiempos de espera con el motor encendido puede evitar un consumo acumulativo innecesario, especialmente en jornadas prolongadas.

4.3.5 Potencia efectiva generada

En la Figura 39 se analiza la distribución de la potencia efectiva demandada por el motor en diferentes modos de funcionamiento. Durante la jornada experimental, el tractor New Holland 7630 operó en un rango de potencia desde 5 kW hasta alcanzar un pico máximo de 53 kW durante las fases de mayor exigencia de trabajo.

Figura 39. *Potencia efectiva generada por actividad*



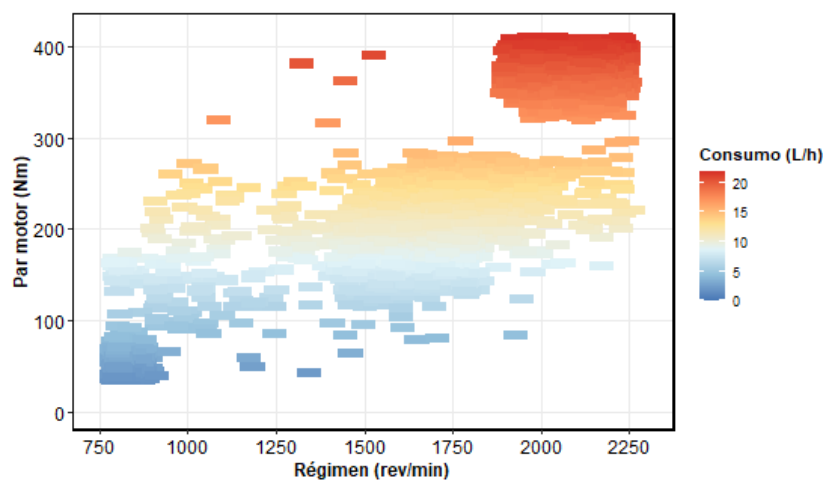
(Autoría propia)

El modo de arado representa la mayor exigencia mecánica, alcanzando una potencia efectiva de aproximadamente 50 kW para vencer la resistencia del suelo. Por debajo de este nivel se encuentran los modos de traslado y maniobra, con promedios cercanos a 32 kW. Finalmente, el modo ralenti registra la demanda más baja con un promedio de 7 kW, valor que corresponde al consumo de potencia necesaria para mantener el funcionamiento del motor y los sistemas auxiliares del tractor sin realizar trabajo útil.

4.3.6 *Mapa de desempeño energético*

En la Figura 40, se observa el mapa de desempeño energético que permite visualizar la relación entre el régimen del motor, el par motor y el consumo horario de combustible en litros por hora.

Figura 40. *Mapa de desempeño energético*



(Autoría propia)

Los picos de mayor consumo, representados de color rojo superan los 20 L/h y se localizan en las zonas de torques superiores a 300 Nm y regímenes por encima de 1800 RPM. Esta región corresponde a la labor de arado, donde el motor debe vencer la máxima resistencia al suelo.

Por el contrario, las zonas de bajo consumo, representadas de color azul pertenecen al estado de ralentí y transporte sin carga, donde el motor realiza un esfuerzo mecánico mínimo, por debajo de los 150 Nm de torque, con valores de consumo inferiores a 5 L/h.

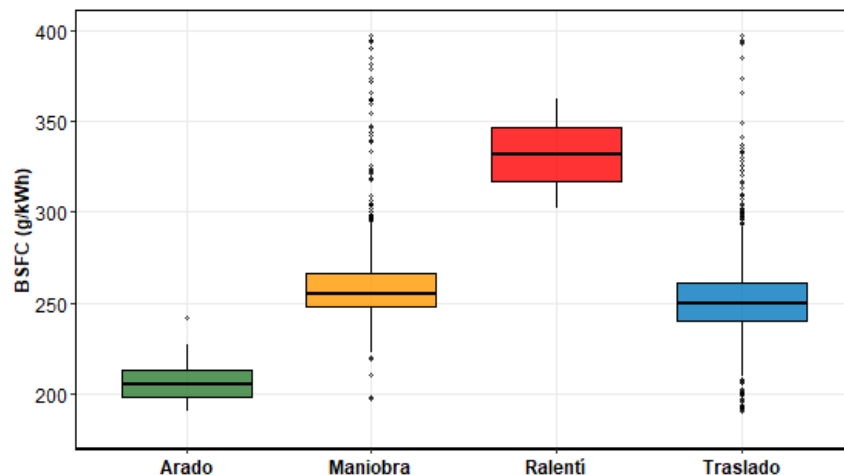
4.4 Análisis de indicadores de eficiencia específica y conversión energética

La evaluación del desempeño del tractor no solo se realiza en la medición del consumo volumétrico (L/h), se debe relacionar con la potencia mecánica efectiva entregada. A continuación, se analizan los parámetros que permiten identificar los regímenes de operación donde el motor optimiza el proceso de combustión y minimiza las pérdidas energéticas.

4.4.1 Consumo específico de combustible (BSFC)

En la Figura 41 se presenta el BSFC (g/kWh) para los distintos modos de operación, permitiendo evaluar la eficiencia termodinámica del motor.

Figura 41. Consumo de combustible específico por actividad realizada



(Auditoría propia)

Se observa que la mayor ineficiencia ocurre en el modo ralentí, representado por la ausencia de trabajo mecánico útil con una mediana de aproximadamente 330 g/kWh. Aunque el consumo de combustible es bajo, al no existir producción de trabajo mecánico, el consumo de combustible por unidad de potencia se dispara, confirmando que la operación en ralentí representa el estado de menor aprovechamiento energético del motor, aumentando las pérdidas por bombeo y fricción interna.

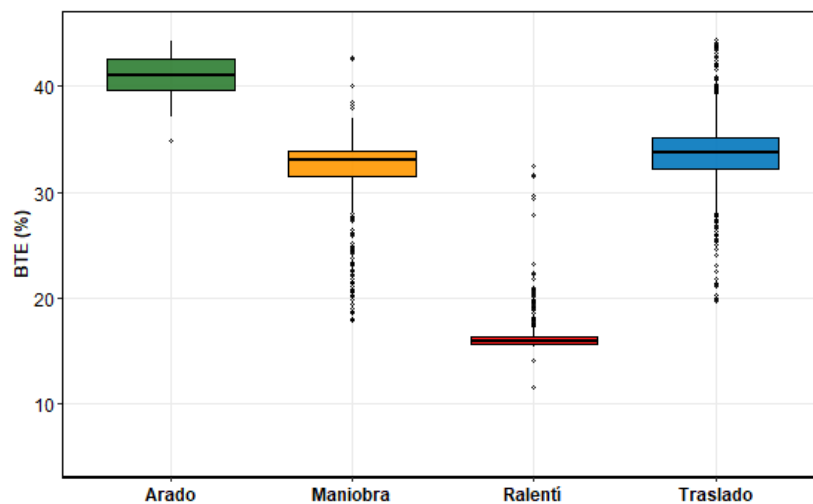
Por el contrario, la operación de arado presenta valores de BSFC de aproximadamente 220 g/kWh. La caja de arado es la más compacta y baja del conjunto, lo que confirma que es el punto de máxima eficiencia. La reducida dispersión de los datos sugiere una operación consistente por parte del operario, quien mantuvo el régimen de giro dentro del rango óptimo señalado en el tacómetro.

Finalmente, las actividades de maniobra y transporte presentan valores intermedios de 270 g/kWh y 250 g/kWh, respectivamente. En las maniobras, la mayor amplitud de la caja atribuye a aceleraciones intermitentes necesarias para los giros en las cabeceras. En el caso de transporte, presenta una caja más compacta, aunque con picos de consumo específico que responden a las irregularidades y cambios de suelo.

4.4.2 Eficiencia térmica al freno (BTE)

En la Figura 42 se presenta la eficiencia térmica al freno (BTE, por sus siglas en inglés) para los distintos modos de operación del tractor, parámetro que cuantifica la capacidad del motor para transformar la energía química del combustible en trabajo mecánico.

Figura 42. Eficiencia térmica al freno por actividad



(Autoría propia)

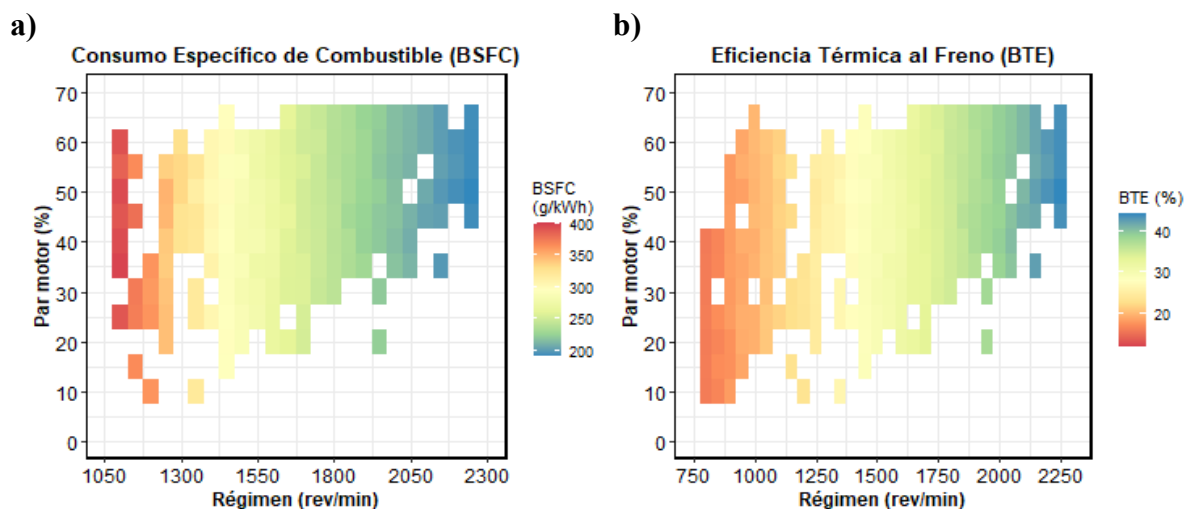
El modo de arado presenta la mayor eficiencia térmica, con una mediana cercana al 42%. Este valor indica que, bajo cargas elevadas y constantes, el motor alcanza su punto de operación óptimo, maximizando la conversión energética. En el extremo opuesto, el modo ralenti presenta la eficiencia más baja, con aproximadamente 15%, en este estado, la mayor parte de la energía se disipa en forma de calor y pérdidas mecánicas internas.

Por otro lado, en el traslado muestra niveles de eficiencia intermedios, promediando un 34%. Este rendimiento se considera aceptable debido a que el motor mantiene regímenes de revoluciones estables. Finalmente, en el modo maniobra logra una eficiencia del 32%, caracterizándose por una mayor dispersión de datos, debido a los cambios constantes en la aceleración y torque presentados durante los giros en las cabeceras del terreno.

4.4.3 Análisis de mapas de calor BTE vs BSFC

La Figura 43 presenta una comparativa entre el consumo específico (BSFC) y la eficiencia térmica al freno (BTE) mediante el uso de mapas de calor. Se puede evidenciar que la región de mínimo consumo de combustible coincide con la zona de mayor aprovechamiento energético del motor New Holland 7630.

Figura 43. a) Mapa de calor BSFC, b) Mapa de calor BTE



(Autoría propia)

Al analizar el mapa a), se evidencia que el cuadrante superior derecho, con regímenes superiores a las 1800 revoluciones por minuto y torques mayores al 50% presenta la menor demanda de combustible por cada unidad de energía generada. Este sector coincide con la actividad de arado. Por el contrario, en el extremo inferior izquierdo, por debajo de 1250 RPM y torques reducidos, el consumo de combustible incrementa de forma exponencial. Este comportamiento, característico de la fase de ralentí, evidencia que la energía no se traduce como trabajo mecánico útil.

En el mapa de calor b) cuantifica el porcentaje de transformación de la energía química en energía efectiva. En la zona correspondiente a los parámetros de arado, existe la mayor eficiencia térmica de aproximadamente 35 a 40%, logrando una combustión más completa. Sin

embargo, en la zona de ralentí, la eficiencia térmica disminuye, confirmando que la mayor parte de la energía química del diésel se disipa en pérdidas.

4.5 Evaluación del impacto ambiental

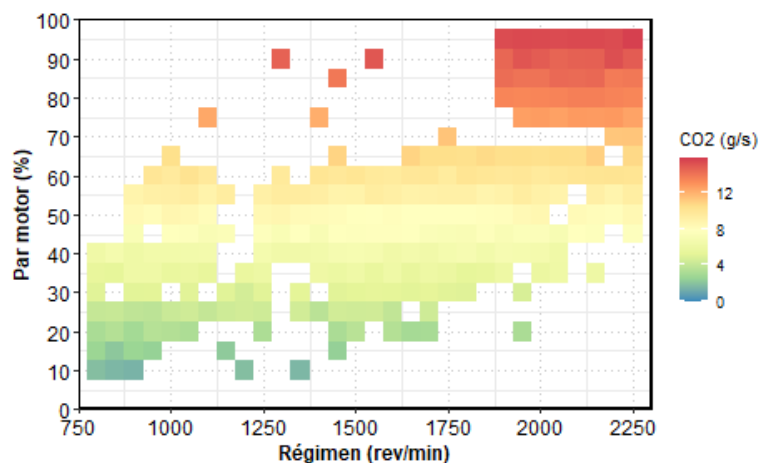
La cuantificación del impacto ambiental se centra en el análisis de las emisiones de CO₂ mediante herramientas gráficas que permitan identificar cuáles son las actividades que generan mayores y menores emisiones de gases. De igual manera, se reconocen las fases operativas críticas en términos de consumo de combustible. Asimismo, se emplean mapas de rendimiento, que facilitan el reconocimiento de las zonas de mayor y menor intensidad de emisión del motor.

4.5.1 Análisis de la tasa de emisión de CO₂

Como se observa en la Figura 44, la mayor tasa de emisión másica de CO₂ ocurre en el cuadrante de alta demanda y régimen elevado. Este sector, donde las emisiones superan, los 12 g/s, se localiza por regímenes superiores a los 1800 RPM y cargas sobre el 50%. Esta región coincide con la labor de arado, donde el sistema de inyección suministra un caudal elevado de combustible para vencer la resistencia del suelo, intensificando la liberación de gases por unidad de tiempo.

Por el contrario, la menor intensidad de emisión se registra en el estado de ralentí, con valores inferiores a 4 g/s asociados a regímenes menores a 1000 RPM y cargas cercanas al 20%. Finalmente, las operaciones de maniobra y traslado exhiben un comportamiento intermedio, con flujos de entre 6 g/s y 8 g/s, reflejando estados de carga parcial donde la demanda de potencia no es máxima.

Figura 44. Mapa de calor de la emisión de CO₂



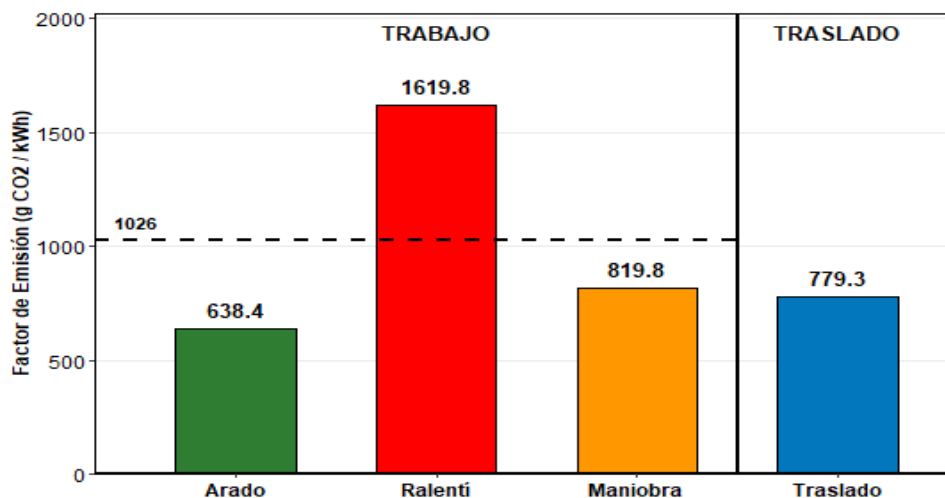
(Autoría propia)

4.5.2 Factor de emisión específico

Como se observa en la Figura 45, el análisis del factor de emisión permite evaluar la eficiencia ambiental del motor según la actividad. Mediante una línea de referencia que representa el promedio de emisiones en el bloque de trabajo con un consumo de 1026 gCO₂/kWh, se establecen las siguientes comparaciones:

La actividad de arado, a pesar de realizar el trabajo mas exigente, resulta ser la operación mas eficiente ambientalmente al registrar 638.4 gCO₂/kWh. Al situarse por debajo de la línea de referencia, demuestra que bajo cargas elevadas el motor realiza una combustión óptima, minimizando las emisiones por cada unidad de trabajo generada. Por el contrario, el modo ralentí se identifica como el estado crítico, con una emisión específica de 1619.8 gCO₂/kWh, este valor se coloca por encima debido a la baja potencia efectiva, lo que genera un alto impacto ambiental. Seguidamente, la operación de maniobra generó 819.8 gCO₂/kWh, manteniéndose por debajo de la línea de referencia. Finalmente, el traslado registra 779.3 gCO₂/kWh, mostrando un comportamiento moderado, debido a la menor exigencia mecánica que presenta.

Figura 45. Factor de emisión específico por actividad



(Autoría propia)

Por el contrario, el modo ralentí es el punto crítico de contaminación, con una emisión específica de 1619.4 g/kWh. Esto representa un incremento de 153.7% respecto al modo de arado, aunque el consumo sea mínimo en ralentí, la ausencia de potencia efectiva generada dispara el factor de emisión.

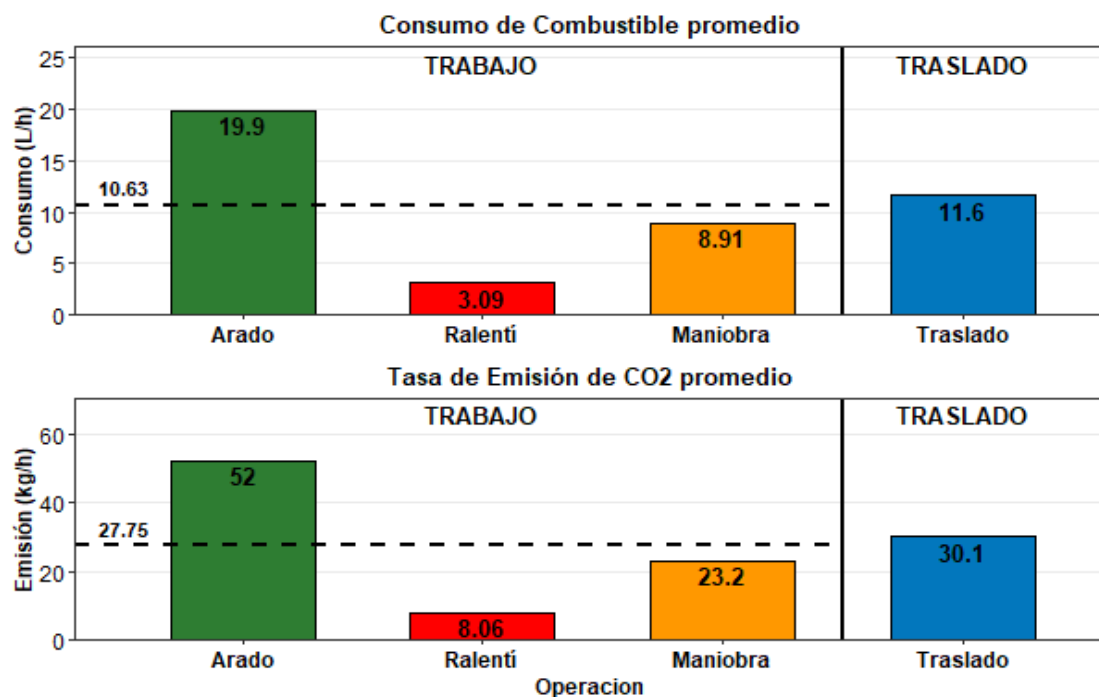
Finalmente, las actividades de maniobra y traslado presentan factores de emisión intermedios de 820.4 g/kWh y 779.3 g/kWh, respectivamente. La mayor variabilidad observada en las

maniobras proceden de los cambios de marcha y acelerones para realizar los giros de cabecera. En comparación, el transporte presenta un comportamiento más tranquilo, entre la ineficiencia del ralenti y la optimización alcanzada durante el trabajo.

4.5.3 Evaluación del consumo por hora de trabajo e impacto de la huella de carbono

Como se observa en la Figura 46, se evidencia los consumos y emisiones horarias mediante una segmentación operativa que distingue el ciclo de trabajo de la fase de traslado. A través de una línea de referencia que representa el promedio de consumo en trabajo (10.63 L/h y 27.76 kgCO₂/h), se identifican los siguientes comportamientos: en primer lugar, el arado destaca como la operación con mayor demanda, situándose por encima del promedio, con un consumo de 19.9 L/h y una emisión de 52 kgCO₂/h, lo que representa el modo de máximo esfuerzo de la actividad agrícola. En segundo lugar, la operación de maniobra ubicándose por debajo de la línea de referencia con un consumo de 8.91 L/h y una emisión de 23.2 kgCO₂. Por su parte, el modo ralenti consumió 3.09 L/h, evidenciando que, aún en ausencia de trabajo útil, el motor genera una emisión de 8.06 kgCO₂/h, lo que representa que a pesar de ubicarse por debajo del promedio genera un impacto ambiental y económico significativo. Finalmente, el traslado registró un consumo de 11.6 L/h y una emisión de 30.1 kgCO₂/h, reflejando el gasto energético por el desplazamiento logístico fuera del terreno.

Figura 46. Promedios de consumo de combustible y tasa de emisión de CO₂ por hora de trabajo.



(Autoría propia)

4.6 Factores de consumo y emisión

En la Tabla 24 se presentan los factores de emisión y consumo. En ella, se evidencia los valores de la eficiencia energética por cada de labor. Los resultados demuestran que durante la labor de arado el motor alcanza su punto de operación óptimo, registrando la eficiencia térmica al freno con un 41.09% y el menor consumo específico de combustible de 205.54 g/kWh. Es fundamental destacar que, aunque presenta la mayor tasa de emisión instantánea de 14.75 g/s debido a la alta demanda de torque, registra el menor factor de emisión específica 638.38 g/kWh. Esto confirma que la combustión es más completa y eficiente bajo cargas pesadas. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Hou et al. (2023) [54], quienes sostienen que los motores diésel agrícolas alcanzan su máxima eficiencia mecánica y menores tasas de consumo específico cuando operan en regímenes de carga alta, optimizando la combustión.

Por el contrario, el modo de ralentí evidencia una degradación crítica de la eficiencia, con un BTE que desciende hasta el 16.23%, mientras que el factor de CO₂ se dispara a 1619.42 g/kWh. Estos datos evidencian que los tiempos muertos son los responsables de la ineficiencia ambiental y el desperdicio energético en la jornada. Finalmente, las labores de traslado y maniobra presentan valores de eficiencia intermedios de 33.78% y 32.28%, respectivamente. Es notable que la maniobra genera un factor de emisión de 819.38 g/kWh, superior al de traslado (779.47 g/kWh), debido a los constantes cambios de régimen y aceleraciones transitorias que impiden que el motor se estabilice en una zona de alta eficiencia.

Tabla 24. *Valores promedios de eficiencia y factores de emisión y consumo*

Operación	Valor Promedio %	Factores de emisión por energía generada (g/kWh)		Tasas Promedio (g/s)	
	BTE	BSFC	CO ₂	FC	CO ₂
Arado	41.09	205.54	638.38	4.65	14.45
Maniobra	32.28	264.14	819.38	2.08	6.45
Ralentí	16.23	314.40	1619.42	0.72	2.24
Traslado	33.78	250.90	779.27	2.69	8.37
Promedio	30.85	258.74	964.36	2.54	7.88

(Autoría propia)

CAPITULO IV

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La implementación de un sistema de telemetría mediante el dispositivo CANedge2, junto con el módulo CANmod.input y flujómetros DFM, permitió recopilar datos precisos y continuos del funcionamiento del tractor agrícola en condiciones reales de operación. Esta herramienta facilitó el monitoreo no intrusivo de variables clave como el caudal de combustible, las revoluciones del motor (RPM) y la posición geográfica, lo que representa una alternativa técnica viable para estudios de consumo energético en el sector agrícola.
- Se validó la selección del tractor New Holland 7630 como unidad de estudio, por ser un vehículo representativo de la maquinaria agrícola pesada en labores de arado. Su elección se fundamentó en la disponibilidad operativa, factor que garantizó el acceso para la instalación de equipos de medición de consumo de combustible y emisiones durante la actividad agrícola.
- Se realizó el monitoreo dinámico del tractor New Holland 7630 mediante la captura de datos en condiciones de operación real, abarcando los modos de ralentí, arado, maniobras y traslado. Los resultados permitieron determinar que, aunque el traslado representó la mayor duración de la jornada, el arado es el modo de operación de mayor consumo de combustible.
- Se determinaron los indicadores de consumo y ambientales del tractor New Holland 7630 en condiciones reales, estableciendo que el consumo horario máximo alcanza los 19.9 L/h durante la labor de arado, lo que representa un incremento del 71.5% respecto al modo de traslado (11.6 L/h). En cuanto a la huella de carbono, la tasa de emisión de CO₂. Asimismo, se identificó que el factor de emisión de CO₂ más crítico se registró durante el arado con 52 kg/h, mientras que, en ralentí, a pesar de tener el consumo más bajo de 3.09 L/h, se identificó el factor de emisión específico más alto con 1647.8 g CO₂/kWh. Este comportamiento demuestra que la eficiencia térmica del motor alcanza su punto óptimo bajo carga pesada (41%).
- Se demostró que el uso combinado de sensores de flujo de combustible (flujómetros), señal de RPM desde el tablero del tractor, y el posterior procesamiento de los datos en R permitió estimar de forma efectiva el consumo específico de combustible (g/kWh).

Esta metodología es replicable y puede adaptarse a diferentes modelos de tractor con mínimas modificaciones.

- Los resultados obtenidos muestran que el consumo de combustible varía significativamente según el tipo de labor agrícola realizada, la topografía del terreno y el régimen de trabajo del motor. En tareas con mayor exigencia de potencia, como la labranza o el transporte en pendiente, se observaron incrementos marcados en el consumo horario y específico.
- Se estimaron indirectamente las emisiones contaminantes de CO₂ a partir del consumo de combustible, basándose en factores de emisión estandarizados. Esto permitió vincular el desempeño energético del tractor con su impacto ambiental, aportando un criterio adicional para la toma de decisiones hacia una agricultura más eficiente y sostenible.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda continuar con la implementación de sistemas de telemetría en maquinaria agrícola para mejorar el control del consumo de combustible y el monitoreo del rendimiento operativo en tiempo real. Esta práctica puede contribuir significativamente a la eficiencia energética y a la reducción de costos en la producción agrícola.
- Para estudios futuros, se sugiere complementar los datos recolectados con sensores adicionales como sensor de carga del motor, con el fin de obtener estimaciones más precisas de emisiones y eficiencia energética, especialmente en diferentes tipos de labores agrícolas.
- Es recomendable validar los datos obtenidos con instrumentos certificados, para reducir márgenes de error y respaldar la confiabilidad de las mediciones realizadas en campo mediante telemetría.
- Se aconseja mejorar la gestión de la alimentación eléctrica de los sensores y módulos electrónicos instalados en el tractor, ya que una fuente de energía estable garantiza la continuidad en la adquisición de datos y reduce el riesgo de pérdida de información.
- Se recomienda fomentar la capacitación de operarios y técnicos agrícolas en el uso de herramientas de monitoreo y análisis de datos, para que puedan interpretar los resultados y adoptar prácticas más eficientes y sostenibles en el uso de maquinaria.

- Finalmente, se sugiere replicar este tipo de estudios en distintos tipos de tractores, cultivos y condiciones geográficas, con el objetivo de generar una base de datos regional que permita establecer patrones de consumo y estrategias de mejora adaptadas a cada realidad agrícola.

ANEXOS

ANEXO 1: CÓDIGO DE CONFIGURACIÓN DEL CANEDGE 2

```
{
  "general": {
    "device": {
      "meta": "22Nov25"
    },
    "security": {},
    "debug": {
      "syslog": 1,
      "restart_timer": 120
    }
  },
  "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": 2,
    "timezone": 0,
    "adjustment": 0,
    "tolerance": 30,
    "ntp_server": "/*.pool.ntp.org"
  },
  "secondaryport": {
    "power_schedule": []
  },
  "can_internal": {
    "general": {
      "rx_state": 1,
      "tx_state": 1
    },
    "filter": {
      "id": [
        {
          "name": "Heartbeat",
          "state": 0,
          "type": 0,
          "id_format": 0,
          "method": 0,
          "f1": "2",
          "f2": "2",
          "prescaler_type": 0
        },
        {
          "name": "TimeCalendar",
          "state": 0,
          "type": 0,
          "id_format": 0,
          "method": 0,
          "f1": "3",
          "f2": "3",
          "prescaler_type": 0
        },
        {
          "name": "GnssStatus",
          "state": 1,
          "type": 0,
          "id_format": 0,
          "method": 0,
          "f1": "65",
          "f2": "65",
          "prescaler_type": 0
        },
        {
          "name": "GnssTime",
          "state": 1,

```

```

"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "66",
"f2": "66",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnsssPosition",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "67",
"f2": "67",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssAltitude",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "68",
"f2": "68",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssDistance",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6A",
"f2": "6A",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssSpeed",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6B",

```

```

"f2": "6B",
"prescaler_type": 0
},
{
"name": "GnssGeofence",
"state": 1,
"type": 0,
"id_format": 0,
"method": 0,
"f1": "6C",
"f2": "6C",
"prescaler_type": 0
},
"stop": {
"message": {
"chn": 0,
"id_format": 0,
"id": "0",
"id_mask": "7FF"
},
}
},
"can_1": {
"general": {
"rx_state": 1,
"tx_state": 1
},
"phy": {
"mode": 0,
"retransmission": 1,
"fd_spec": 0,
"bit_rate_cfg_mode": 1,
"bit_rate_std": 500000,
"bit_rate_fd": 1000000
},
"trigger_high": 0,
"trigger_low": 0
}
},
"can_2": {
"general": {
"rx_state": 1,
"tx_state": 1

```


ANEXO 3: FASE DE TRASLADO DEL TRACTOR



ANEXO 4: PANEL DE INSTRUMENTOS TRACTOR NEW HOLLAND 7630



Referencias bibliográficas.

- [1] A. Janulevičius y A. Čipliesnė, «Estimation of engine CO₂ and NO_x emissions and their correlation with the not-to-exceed zone for a tractor ploughing fields of various sizes», *J. Clean. Prod.*, vol. 198, pp. 1583-1592, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.078.
- [2] W.-S. Kim *et al.*, «Evaluation of exhaust emissions of agricultural tractors using portable emissions measurement system in Korean paddy field», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, p. 3491, feb. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-53995-0.
- [3] «(PDF) Timber Extraction by Farm Tractors in Low-Removal-Intensity Continuous Cover Forestry: A Simulation of Operational Performance and Fuel Consumption», *ResearchGate*, oct. 2024, doi: 10.3390/f15081422.
- [4] J. Ji *et al.*, «Estimation of typical agricultural machinery emissions in China: Real-world emission factors and inventories», *Chemosphere*, vol. 307, p. 136052, nov. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136052.
- [5] X. Hou, C. Xu, J. Li, S. Liu, y X. Zhang, «Evaluating agricultural tractors emissions using remote monitoring and emission tests in Beijing, China», *Biosyst. Eng.*, vol. 213, pp. 105-118, ene. 2022, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2021.11.017.
- [6] H. Xiuning, «Measurement of engine performance and maps-based emission prediction of agricultural tractors under actual operating conditions», *ResearchGate*, dic. 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113637.
- [7] R. Lucasz, «Use of emission indicators related to CO₂ emissions in the ecological assessment of an agricultural tractor | Request PDF», *ResearchGate*, oct. 2024, doi: 10.17531/ein.2021.4.2.
- [8] Ł. Rymaniak *et al.*, «The role of real power output from farm tractor engines in determining their environmental performance in actual operating conditions», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 173, p. 105405, jun. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105405.
- [9] M. Siedlecki, N. Szymlet, P. Fuć, y B. Kurc, «Analysis of the Possibilities of Reduction of Exhaust Emissions from a Farm Tractor by Retrofitting Exhaust Aftertreatment», *Energies*, vol. 15, n.º 21, Art. n.º 21, ene. 2022, doi: 10.3390/en15217963.
- [10] Y. Zhang, D. Lou, P. Tan, Z. Hu, y L. Fang, «Emission characteristic of non-road mobile machinery using a catalysed diesel particle filter with different catalyst loadings under actual operating conditions», *J. Clean. Prod.*, vol. 327, p. 129482, dic. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129482.
- [11] A. Jonama, «Homologación de vehículos especiales agrícolas - Homologación de tipo exenciones de homologación conformidad de la producción». Applus IDIADA, 2009. Accedido: 13 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://agricultura.gencat.cat/web/.content/ag_agricultura/ag04_centre_mecanitzacio_agraria/documents/fitxers_estatics/any_2009/jornada_seguretat_viaria09/ptsv03.pdf
- [12] A. ATARES, PEDRO y L. BLANCA, ANTONIO, *Tractores y motores agrícolas*. Ediciones Mundi-Prensa, 1996.

- [13] D. Kortenbruck, H. W. Griepentrog, y D. S. Paraforos, «Machine operation profiles generated from ISO 11783 communication data», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 140, pp. 227-236, ago. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.05.039.
- [14] J. Cuauhtémoc Negrete, A. Liles Tavares Machado, y R. Liles Tavares Machado, «Diseño de tractores agrícolas en México», *Rev. Cienc. Téc. Agropecu.*, vol. 21, n.º 1, pp. 05-11, mar. 2012.
- [15] A. K. A. Mohamed, «ANALYSIS OF TELEMATICS SYSTEMS IN AGRICULTURE», 2013.
- [16] V. Franco, M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger, y P. Dilara, «Road vehicle emission factors development: A review», *Atmos. Environ.*, vol. 70, pp. 84-97, may 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.01.006.
- [17] L. F. Ortega Guerrón y A. A. Piedmag Chuquín, «Análisis de los gases contaminantes y puesta a punto de los motores a diésel y gasolina que existen en los talleres de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz.», bachelorThesis, 2015. Accedido: 2 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4822>
- [18] W. T. Guin, J. S. Aquino, S. B. Gaibor, y M. C. Suarez, «Arquitectura de IoT para el Monitoreo de Emisiones de Gases Contaminantes de Vehículos y su Validación a través de Machine Learning», *Ingenius*, n.º 32, Art. n.º 32, jul. 2024, doi: 10.17163/ings.n32.2024.01.
- [19] Y. Li, Y. Huang, H. Chen, F. Wei, Z. Zhang, y M. Zhou, «Combustion and emission of diesel/PODE/gasoline blended fuel in a diesel engine that meet the China VI emission standards», *Energy*, vol. 301, p. 131473, ago. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131473.
- [20] H. Zhu *et al.*, «Emisiones de vehículos pesados diésel, de gas natural y eléctricos híbridos diésel – Parte 1. Emisiones de NOx, N₂O y NH₃», *Fuel*, vol. 371, p. 132175, sep. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.132175.
- [21] C. Kang, M. Ota, y K. Ushijima, «Benefits of diesel emission regulations: Evidence from the World's largest low emission zone», *J. Environ. Econ. Manag.*, vol. 125, p. 102944, may 2024, doi: 10.1016/j.jeem.2024.102944.
- [22] Y. Chen, X. Wu, K. Hu, y J. Borken-Kleefeld, «Nox emissions from diesel cars increase with altitude», *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 115, p. 103573, feb. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2022.103573.
- [23] N. Y. Rojas, «Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel», *Rev. Ing.*, n.º 20, pp. 58-68, nov. 2004.
- [24] L. Molina y M. Zavala, «Caracterización de las emisiones de fuentes móviles fuera de carretera con motor diésel en México con y sin filtro de partículas». 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/documentos/caracterizacion-de-las-emisiones-de-fuentes-moviles-fuera-de-carretera-con-motor-diesel-en-mexico-con-y-sin-filtro-de-particulas>
- [25] T. V. Johnson, «Review of Vehicular Emissions Trends», *SAE Int. J. Engines*, vol. 8, n.º 3, pp. 1152-1167, abr. 2015, doi: 10.4271/2015-01-0993.
- [26] V. Díaz Suárez y C. Páez Pérez, «Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras», *Acta Nova*, vol. 3, n.º 2, pp. 308-322, jun. 2006.

- [27] L. Ren *et al.*, «Oriented conversion of agricultural bio-waste to value-added products - A schematic review towards key nutrient circulation», *Bioresour. Technol.*, vol. 346, p. 126578, feb. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126578.
- [28] A. Juostas y A. Janulevičius, «Evaluating working quality of tractors by their harmful impact on the environment», *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.*, vol. 17, n.º 2, pp. 106-113, jun. 2009, doi: 10.3846/1648-6897.2009.17.106-113.
- [29] M. S. Middela, A. Mane, B. Djordjevic, y B. Ghosh, «Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Ireland», *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 130, p. 104156, may 2024, doi: 10.1016/j.trd.2024.104156.
- [30] D. Lovarelli y J. Bacenetti, «Exhaust gases emissions from agricultural tractors: State of the art and future perspectives for machinery operators», *Biosyst. Eng.*, vol. 186, pp. 204-213, oct. 2019, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.07.011.
- [31] C. Bordehore, «C. Bordehore. PROBLEMAS AMBIENTALES, PROBLEMAS HUMANOS. Chapter in: Sociología Ambiental. Antonio Aledo and Jose Andrés Domínguez. Grupo Editorial Universitario. 462 pp. Complete book at: <http://www.ua.es/personal/antonio.aledo/librosociologia.html>», 2005, pp. 283-323.
- [32] «Europe's environment: The Dobris Assessment - An overview», European Environment Agency. Accedido: 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-827-5122-8>
- [33] Campo Castilla Y León, «Emisiones contaminantes de los motores en los tractores agrícolas», campo.es. Accedido: 13 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistacampo.es/otros-cultivos/emisiones-contaminantes-de-los-motores-en-los-tractores-agricolas/>
- [34] G. Larsson y P.-A. Hansson, «Environmental impact of catalytic converters and particle filters for agricultural tractors determined by life cycle assessment», *Biosyst. Eng.*, vol. 109, n.º 1, pp. 15-21, may 2011, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.01.010.
- [35] A. Miguel Lombraña, «Reducción de emisiones en los motores diésel aplicados a tractores agrícolas», oct. 2019, Accedido: 2 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10016/30204>
- [36] C. E. Erazo Mora, «Diagnóstico de Motores Diesel Mediante Análisis de Emisiones de Gases», bachelorThesis, 2022. Accedido: 2 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23656>
- [37] J. Gil Sierra, «Los gases contaminantes de los tractores y las tecnologías desarrolladas para su reducción», *Vida RURAL*, pp. 58-61, 1 de abril de 2010.
- [38] M. J. Mafla Alvear y M. Ortiz Guachamin, «Metodología para certificar la calibración de analizadores de gases y opacímetros», bachelorThesis, QUITO/ EPN/ 2007, 2007. Accedido: 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/515>
- [39] L. E. Tipanluisa, A. P. Remache, C. R. Ayabaca, y S. W. Reina, «Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades», *Inf. Tecnológica*, vol. 28, n.º 1, pp. 03-12, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000100002.

- [40] O. US EPA, «Regulations for Emissions from Heavy Equipment with Compression-Ignition (Diesel) Engines». Accedido: 2 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-heavy-equipment-compression>
- [41] L. Pirjola, H. Parviainen, M. Lappi, K. Hämeri, y T. Hussein, «A Novel Mobile Laboratory for “Chasing” City Traffic», presentado en 2004 SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, Toulouse, France, jun. 2004, pp. 2004-01-1962. doi: 10.4271/2004-01-1962.
- [42] J. M. Luján, V. Dolz, J. Monsalve-Serrano, y J. A. López-Cascant, «Nueva normativa anticontaminante en vehículos diésel Euro 6», en *Tecnica Industrial*, Fundación Técnica Industrial, 2017, pp. 28-33. doi: 10.23800/9939.
- [43] H. Zhao *et al.*, «Evaluación de las emisiones de CO₂ y NO_x de camiones portacontenedores diésel mediante un sistema portátil de medición de emisiones», *Build. Environ.*, vol. 252, p. 111266, mar. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111266.
- [44] M. Weiss *et al.*, «Analyzing on-road Emissions of Light-duty Vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS)», JRC Publications Repository. Accedido: 10 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC62639>
- [45] «The Use of the PEMS Equipment for the Assessment of Farm Fieldwork Energy Consumption». Accedido: 12 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.13031/aea.31.11225>
- [46] Ł. Rymaniak, J. Merkisz, N. Szymlet, M. Kamińska, y S. Weymann, «Use of emission indicators related to CO₂ emissions in the ecological assessment of an agricultural tractor», *Eksploat. Niezawodn. – Maint. Reliab.*, vol. 23, n.º 4, pp. 605-611, dic. 2021, doi: 10.17531/ein.2021.4.2.
- [47] M. J. L. P. F. P. R. Ł. Z. A. y W. S., «MEASUREMENT OF EXHAUST EMISSIONS FROM FARM MACHINERY UNDER ACTUAL OPERATING CONDITIONS WITH THE PEMS EQUIPMENT – SELECTED ISSUES», *Mech. Agric. Conserv. Resour.*, vol. 63, n.º 4, pp. 151-156, 2017.
- [48] G. L. Meneses Rosas y B. C. Revelo Obando, «Medición de emisiones de CO₂ en condiciones reales con el uso Sems (Smart Emission Measurement System)», bachelorThesis, 2023. Accedido: 3 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13815>
- [49] M. Mattetti, M. Maraldi, N. Lenzini, S. Fiorati, E. Sereni, y G. Molari, «Outlining the mission profile of agricultural tractors through CAN-BUS data analytics», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 184, p. 106078, may 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106078.
- [50] S. Badhiye, B. Chatur, y Wakode, «Data Logger System: A Survey», 2249-6343, ene. 2011.
- [51] W. Rahiman y Z. Zainal, «An overview of development GPS navigation for autonomous car», en *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, jun. 2013, pp. 1112-1118. doi: 10.1109/ICIEA.2013.6566533.
- [52] G. Smith, «Que es un data logger - la ultima guia», Soluciones de Adquisición de Datos (DAQ). Accedido: 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-data-logger>
- [53] L. Guzzella y C. H. Onder, *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10775-7.

- [54] X. Hou, X. Zhang, S. Huang, P. Xu, y J. Shen, «Measurement of engine performance and maps-based emission prediction of agricultural tractors under actual operating conditions», *Measurement*, vol. 222, p. 113637, nov. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113637.
- [55] I. N. de E. y Censos, «Estadísticas Agropecuarias», Instituto Nacional de Estadística y Censos. Accedido: 29 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- [56] «New Holland Serie 30», Ing. J. Espinosa Z. S.A.S. Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jespinosa.com.ec/inventory/new-holland-serie-30/>
- [57] «CAN Bus Data Loggers - Simple. Pro. Interoperable», CSS Electronics. Accedido: 2 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.csselectronics.com/>
- [58] «CANedge2: 2x CAN Bus Data Logger (SD + WiFi)», CSS Electronics. Accedido: 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.csselectronics.com/products/can-bus-data-logger-wifi-canedge2>
- [59] «Connectors — CANedge2 Docs, 01.09.01 01.09.01 documentation». Accedido: 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://canlogger.csselectronics.com/canedge-docs/ce2/hardware/connector.html?_gl=1*1syzqw9*_ga*ODExMjAzODc1LjE3NDM1NTc0Nzc.*_ga_Y57M75XF5N*MTc0NDEzMjg5NS4xMC4xLjE3NDQxMzMxNzcuMC4wLjA.
- [60] «Medidor de flujo de combustible DFM», Technoton. Accedido: 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jv-technoton.com/es/productos/dfm/>
- [61] «CANmod.input: 8 x Analog/Digital/Pulse to CAN Bus Converter», CSS Electronics. Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.csselectronics.com/products/analog-to-can-bus-digital-pulse>
- [62] «Connector — CANmod.input Docs, 01.04.01 01.04.01 documentation». Accedido: 10 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://canlogger.csselectronics.com/canmod-input-docs/hardware/connector/connector.html?_gl=1*151dhqq*_ga*ODExMjAzODc1LjE3NDM1NTc0Nzc.*_ga_Y57M75XF5N*MTc0NDIyMTEwNC4xMi4xLjE3NDQyMjExMTcuMC4wLjA.#fn-signal-p
- [63] «CANmod.gps: GPS-to-CAN with 3D Inertial Sensor and UDR», CSS Electronics. Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.csselectronics.com/products/gps-to-can-bus-gnss-imu>
- [64] D. Arias, «Análisis del consumo de combustible de un vehículo en condiciones de tráfico real a diferentes altitudes», Universidad Técnica del Norte, Ibarra - Ecuador, 2025.
- [65] «CANedge Config Editor». Accedido: 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://canlogger.csselectronics.com/simple-editor/?_gl=1*djkqpw*_ga*ODExMjAzODc1LjE3NDM1NTc0Nzc.*_ga_Y57M75XF5N*czE3NDcxMDIwNTUkbzY4JGcxJHQxNzQ3MTAyMzM3JGowJGwwJGgw#/
- [66] «Real-Time-Clock — CANedge2 Docs, 01.09.01 01.09.01 documentation». Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://canlogger.csselectronics.com/canedge-docs/ce2/configuration/rtc/index.html>
- [67] «DATA BASE». Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://s6.jv-technoton.com/en/data-base>

[68] «Medidor de flujo de combustible DFM», Technoton. Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jv-technoton.com/es/productos/dfm/>