



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE ACEITES DE MOTOR EN LA FLOTA DE LA
EMAC EP PARA ESTABLECER UNA LÍNEA BASE DE CALIDAD DEL
LUBRICANTE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: EDUARDO SEBASTIÁN ARIAS VINTIMILLA
CHRISTIAN JAVIER ESPINOZA BRAVO
TUTOR: ING. MILTON OSWALDO GARCÍA TOBAR, M.Sc.

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Eduardo Sebastián Arias Vintimilla con documento de identificación N° 0302612452 y Christian Javier Espinoza Bravo documento de identificación N° 0105625024; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos que la Universidad Politécnica Salesiana, puede usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o sin fines de lucro, el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 6 de enero del 2026

Atentamente,



Eduardo Sebastián Arias Vintimilla

0302612452



Christian Javier Espinoza Bravo

0105625024

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Eduardo Sebastián Arias Vintimilla con documento de identificación N° 0302612452 y Christian Javier Espinoza Bravo documento de identificación N° 0105625024, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Caracterización técnica de aceites de motor en la flota de la EMAC EP para establecer una línea base de calidad del lubricante”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de enero del 2026

Atentamente,



Eduardo Sebastián Arias Vintimilla

0302612452



Christian Javier Espinoza Bravo


0105625024

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Oswaldo García Tobar con documento de identificación N° 0104282181, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE ACEITES DE MOTOR EN LA FLOTA DE LA EMAC EP PARA ESTABLECER UNA LÍNEA BASE DE CALIDAD DEL LUBRICANTE**, realizado por Eduardo Sebastián Arias Vintimilla con documento de identificación N° 0302612452 y por Christian Javier Espinoza Bravo con documento de identificación N° 0105625024, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de enero del 2026

Atentamente



Ing. Milton Oswaldo García Tobar, M.Sc.

0104282181

I. DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, de manera muy especial, a mis padres, Rolando Rogelio Espinoza Peralta y Judith Margarita Bravo Neira, quienes con su amor, consejos y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. Gracias a su esfuerzo, comprensión y constante motivación, hoy me encuentro culminando esta etapa tan importante de mi vida académica.

Asimismo, dedico este trabajo a mis hermanas, Diana Peralta y Mariana Bravo, quienes de una u otra manera han sido parte esencial de este proceso, brindándome ánimo, comprensión y acompañamiento constante para continuar y alcanzar mis objetivos dentro de mi carrera universitaria.

De manera especial, dedico este trabajo a mis sobrinas, con el deseo de que este logro sea un ejemplo de que, con esfuerzo, disciplina y perseverancia, es posible alcanzar grandes metas y llegar lejos en su vida personal y profesional.

A todos ellos, mi profundo agradecimiento por creer en mí y apoyarme en cada paso de este camino.

Christian Javier Espinoza Bravo

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, de manera muy especial, a mi madre, Patricia Hipatia Vintimilla Regalado, quien con su amor, consejos y apoyo incondicional ha sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. Gracias a su esfuerzo, comprensión y constante motivación, hoy me encuentro culminando esta etapa tan importante de mi vida académica.

Asimismo, dedico este trabajo a mi hermano, Néstor Fernando Arias Vintimilla, quien de una u otra manera ha sido parte esencial de este proceso, brindándome ánimo, comprensión y acompañamiento constante para continuar y alcanzar mis objetivos dentro de mi carrera universitaria.

De manera especial, dedico este trabajo a mis familiares, con el deseo de que este logro sea un ejemplo de que, con esfuerzo, disciplina y perseverancia, es posible alcanzar grandes metas y llegar lejos en la vida personal y profesional.

A todos ellos, mi profundo agradecimiento por creer en mí y apoyarme en cada paso de este camino.

Eduardo Sebastián Arias Vintimilla

II. AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a mis padres, Rolando Rogelio Espinoza Peralta y Judith Margarita Bravo Neira. por el respaldo brindado a lo largo de mi formación universitaria, el cual permitió contar con las condiciones necesarias para el desarrollo y culminación del presente trabajo de titulación.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor, Milton Oswaldo García Tobar, por su guía académica, profesionalismo y constante disposición para orientar el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones y aportes fueron determinantes para fortalecer la calidad técnica y metodológica del estudio.

De igual manera, extiendo un especial agradecimiento a la empresa EMAC EP, por la apertura institucional y la colaboración brindada durante el proceso de toma de muestras, así como por el apoyo técnico y logístico proporcionado, aspectos indispensables para el cumplimiento de los objetivos planteados.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

Christian Javier Espinoza Bravo

AGRADECIMIENTOS

Al culminar el presente trabajo de titulación, expreso mi más sincero y profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por haberme permitido formar parte de su comunidad académica y desarrollar esta investigación en un entorno caracterizado por el rigor científico, la formación integral y sólidos valores institucionales. La experiencia adquirida en esta casa de estudios ha sido un pilar esencial en mi crecimiento profesional y humano.

Mi reconocimiento se extiende al cuerpo docente de la carrera, cuyo compromiso con la enseñanza, la investigación y la excelencia académica se reflejó a lo largo de todo mi proceso formativo. Sus aportes técnicos, orientaciones metodológicas y permanente disposición para guiar el aprendizaje constituyeron un soporte fundamental para enfrentar los desafíos académicos y alcanzar los objetivos propuestos.

De manera especial, manifiesto mi agradecimiento al Ingeniero Milton García, por su acompañamiento académico, criterio profesional y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Su orientación oportuna, claridad metodológica y confianza depositada en este proyecto fueron determinantes para su adecuada estructuración y culminación, aportando de

forma significativa a mi formación académica y proyección profesional.

Agradezco a mi madre Patricia Hipatia Vintimilla Regalado, quien fue la precursora en mi carrera y un pilar importante en mi vida personal y académica de igual forma a mi hermano Néstor Fernando Arias Vintimilla, el cual fue una fuente de inspiración y un camino lleno de logros académicos y personales el cual marco un fuerte vínculo en mi aprendizaje

Finalmente, expreso mi gratitud a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron al logro de este objetivo académico. Los conocimientos, experiencias y valores adquiridos en la Universidad Politécnica Salesiana constituirán una base sólida que guiará mi desempeño profesional con responsabilidad, ética y compromiso social.

Eduardo Sebastián Arias Vintimilla

III. RESUMEN

La flota vehicular de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) opera en condiciones urbanas severas, caracterizadas por arranques frecuentes, ralenti prolongado y altas cargas térmicas, lo que incrementa el riesgo de degradación prematura del aceite lubricante. No obstante, la gestión del mantenimiento se ha basado tradicionalmente en intervalos de cambio fijos, sin considerar el estado real del lubricante ni las condiciones locales de operación y almacenamiento. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar técnicamente los aceites de motor utilizados en la flota de EMAC EP, con el fin de establecer una línea base de calidad del lubricante que permita una toma de decisiones técnicas fundamentadas antes de su uso operativo.

La metodología adoptada corresponde a un enfoque descriptivo, analítico y experimental de laboratorio. Se analizaron 15 muestras representativas de aceite SAE 15W-40, tanto en condición de almacenamiento como en servicio, mediante técnicas normalizadas conforme a normas ASTM e ISO. Los ensayos incluyeron espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) según ASTM E2412, determinación de viscosidad cinemática (ASTM D445), número ácido total (TAN, ASTM D664), número básico total (TBN, ASTM D2896), contenido de agua y conteo de partículas (ISO 4406). Adicionalmente, se realizó una validación experimental de la línea base mediante la contaminación controlada del aceite con agua, combustible diésel y glicol.

Los resultados evidencian que el aceite almacenado mantiene estabilidad fisicoquímica y espectral, mientras que las muestras en servicio presentan incrementos moderados de oxidación, nitración y consumo de aditivos, coherentes con procesos normales de operación. A partir de estos resultados, se establecieron rangos internos de referencia para parámetros críticos, clasificando el lubricante en condiciones aceptables, de alerta o críticas.

El principal aporte del estudio consiste en la definición de una línea base técnica adaptada a las condiciones reales de la EMAC EP, que fortalece la implementación del mantenimiento predictivo, optimiza el uso del lubricante y contribuye a mejorar la confiabilidad operativa y la sostenibilidad del programa de mantenimiento vehicular

Palabras clave: Análisis de aceite lubricante, Línea base del lubricante, Espectroscopía FTIR, Mantenimiento predictivo, Aceite de motor diésel, Degradación del lubricante, Condición del aceite, Gestión de flotas vehiculares.

IV. ABSTRACT

The Municipal Cleaning Company of Cuenca (EMAC EP) operates a fleet under severe urban conditions characterized by frequent start–stop cycles, prolonged idling, and elevated thermal loads, which significantly increase the risk of premature lubricant degradation. However, maintenance management has traditionally relied on fixed oil change intervals, without considering the lubricant's actual condition or specific local operating and storage conditions. In this context, the present study aims to technically characterize the engine oils used in the EMAC EP fleet in order to establish a baseline oil condition that supports informed, condition-based maintenance decision-making prior to operational use.

The adopted methodology follows a descriptive, analytical, and experimental laboratory approach. Fifteen representative samples of SAE 15W-40 engine oil were analyzed, including oils stored and in service. Standardized test methods in accordance with ASTM and ISO standards were applied. The analyses included Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) following ASTM E2412, kinematic viscosity determination (ASTM D445), Total Acid Number (TAN, ASTM D664), Total Base Number (TBN, ASTM D2896), water content determination, and particle count analysis according to ISO 4406. Additionally, the proposed baseline was experimentally validated by controlled contamination of the lubricant with water, diesel fuel, and glycol.

The results indicate that the stored oil exhibits high physicochemical and spectral stability, while in-service samples show moderate increases in oxidation, nitration, and additive depletion, consistent with normal operating degradation mechanisms. Based on these findings, internal reference ranges were defined for key oil condition indicators, allowing the classification of the lubricant into acceptable, warning, or critical condition levels.

The main contribution of this study lies in the establishment of a technically justified lubricant baseline tailored to the real operating conditions of the EMAC EP fleet. This baseline strengthens the implementation of predictive maintenance strategies, optimizes lubricant utilization, and contributes to improved operational reliability and sustainability of the vehicle maintenance program.

Keywords: Lubricant oil analysis, Lubricant baseline, FTIR spectroscopy, Predictive maintenance, Diesel engine oil, Lubricant degradation, Oil condition monitoring, Vehicle fleet management.

INDICE GENERAL

I.	DEDICATORIA.....	v
II.	AGRADECIMIENTOS.....	vii
III.	RESUMEN	x
IV.	ABSTRACT	12
1.	INTRODUCCION.....	22
2.	PROBLEMA DE ESTUDIO	23
2.1	Antecedentes.....	24
2.2	Importancia y Alcances	26
2.3	Evaluación técnica de parámetros del lubricante	27
2.4	Aplicación del análisis de aceite como herramienta predictiva.....	27
2.5	Construcción de una línea base	27
2.6	Propuesta de optimización del programa de mantenimiento.....	28
2.7	Delimitación	28
3.	OBJETIVOS.....	29
3.1	Objetivo General.....	29
3.2	Objetivos Específicos	29
4.	CAPÍTULO 1: REVISIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	30
4.1	Composición y Clasificación de Aceites de Motor	31
4.2	Clasificación API para aceites de motor diésel y sus aplicaciones	32
4.3	Funciones del lubricante en el motor.....	34

4.4	Mecanismos de Degradación del Aceite	36
4.5	Técnicas Analíticas para la Evaluación de Aceites	38
4.6	Principios operativos y ventajas del análisis de aceite	46
4.7	Estado del arte	48
4.8	Estudios específicos en la EMAC EP	49
5.	CAPITULO 2: Determinar los parámetros fisicoquímicos relevantes para evaluar la calidad del lubricante, utilizando técnicas de laboratorio como la espectroscopía FTIR, la titulación potenciométrica (TAN), la determinación de agua con Karl Fischer (agua) y el conteo de partículas.....	50
5.1	Población, muestras y criterios de selección	50
5.2	Criterios de análisis espectral FTIR según ASTM E2412.....	52
5.3	Espectros de referencia del aceite nuevo mediante ERASPEC OIL.....	58
5.4	Análisis espectral FTIR de las muestras de aceite lubricante.....	62
6.	CAPITULO 3: Comparar los resultados obtenidos en los análisis con las especificaciones del fabricante y estándares técnicos aplicables, para verificar el cumplimiento de criterios de calidad.	62
6.1	Comparación de resultados con especificaciones del fabricante y estándares técnicos.....	63
6.2	Evaluación por tendencia FTIR del aceite lubricante: referencia vs muestras en servicio	65
6.3	Comparación global de los indicadores FTIR en muestras de aceite en servicio	65
6.3.1	Espectro aceite base vs camión AMA1499	65

6.3.2	Espectro aceite base vs camión AMA1094 & AMA1093.....	68
6.3.3	Análisis técnico comparativo de los espectros FTIR de aceite en servicio (ASTM E2412).....	70
6.4	Comparación de viscosidad SAE J300 y fabricante.....	72
6.4.1	Interpretación técnica de los parámetros reológicos y fisicoquímicos del lubricante	72
6.4.2	Evaluación integrada de indicadores FTIR del aceite lubricante	74
6.4.3	Relación entre degradación química y condición del aceite.....	74
6.4.4	Indicadores FTIR en aceite en servicio	75
7.	Capítulo 4: Establecer rangos de referencia internos que definan una línea base técnica para la aceptación, reprocesamiento o descarte de aceites de motor almacenados, ajustados a las condiciones locales de almacenamiento y uso	76
7.1	Rangos de referencia internos para indicadores FTIR del aceite lubricante	77
7.2	Definición de la línea base del lubricante.....	78
7.3	Validación experimental de la línea base mediante contaminación controlada.....	79
7.3.1	Metodología de contaminación controlada	79
7.4	Análisis ante contaminación controlada del lubricante	85
8.	Conclusiones.....	87
9.	Recomendaciones	88
10.	Referencias bibliográficas	90

11.	ANEXOS	95
11.1	Enfoque de apoyo metodológico	95
11.1.1	Anexo A Tabla de resultados de viscosidad cinemática a 40 °C y 100 °C de las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM D445)	95
11.1.2	Anexo B Tabla de resultados de TAN y TBN de las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM D664 / ASTM D2896).....	96
11.1.3	Anexo C Tabla de los indicadores FTIR de oxidación, nitración, subproductos de sulfatación y hollín de las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM E2412)	97
11.1.4	Anexo D Gráfica de los indicadores de aditivos (tendencia por FTIR) de las muestras de aceite lubricante analizadas.....	98
11.1.5	Anexo E Tabla de contenido de agua determinado por FTIR en las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM E2412).....	99
11.1.6	Anexo F Figura de la comparación de espectros FTIR completos y regiones características ASTM E2412 entre muestras de aceite en servicio de los camiones AMA1097 y AMA1104 y aceite base de referencia.	100
11.1.7	Anexo G Figura de la comparación de espectros FTIR completos y regiones características ASTM E2412 entre muestras de aceite en servicio del camión AMA1105 y aceite base de referencia.	101
11.1.8	Anexo H Imagen del vehículo de la flota utilizado en el proceso de muestreo de aceite lubricante.	102
11.1.9	Anexo I Imagen de la toma de muestra de aceite lubricante desde el motor del vehículo de la flota.	103

11.1.10	Anexo J Imagen del sistema de almacenamiento y distribución de aceite lubricante en barriles.....	104
11.1.11	Anexo K Imagen de la Manipulación y traslado de barril de aceite lubricante en el área de almacenamiento.....	105
11.1.12	Anexo L Imagen de resultados del análisis FTIR obtenidos mediante el equipo ERASPEC OIL.	106
11.1.13	Anexo M Imagen de la preparación y homogeneización de muestra de aceite lubricante en laboratorio.....	107
11.1.14	Anexo N Imagen del equipo ERASPEC OIL utilizado para el análisis FTIR de las muestras de aceite lubricante.	108
11.1.15	Anexo O Imagen de la extracción y transferencia de muestra de aceite lubricante para análisis.	109
11.1.16	Anexo P Imagen del aceite lubricante base utilizado como referencia en el estudio.....	110

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Analizador automático de viscosidad.	40
Figura 2 Equipo de titulación (TAN) y del número básico (TBN).	41
Figura 3 Equipo Karl Fischer Metrohm 851/801 utilizado para la determinación de contenido de agua según ASTM D6304.	42
Figura 4 Analizador FTIR ERASPEC Oil utilizado para la evaluación química del aceite lubricante y la detección de procesos de oxidación, nitración y sulfatación conforme a la norma ASTM E2412.	43
Figura 5 Equipo ICP-OES utilizado para la determinación de metales de desgaste, contaminantes y aditivos en aceites lubricantes, según la norma ASTM D5185.	45
Figura 6 Contador automático de partículas Eralytics ERACOUNT XS utilizado para la clasificación de limpieza del lubricante según ISO 4406.	46
Figura 7 Toma de muestras.	52
Figura 8 Respuesta espectral FTIR de aceites lubricantes, de la norma ASTM E2412.56	
Figura 9 Espectros FTIR del aceite lubricante recolectado del sistema de almacenamiento (manguera) en diferentes fechas, obtenidos mediante analizador ERASPEC OIL.	59
Figura 10 Espectros FTIR correspondientes a la recolección de aceite lubricante realizada el 13/10/2025,	61
Figura 11 Espectros FTIR correspondientes al aceite lubricante nuevo utilizado como referencia (aceite base recolectado el 13/10/2025) y a muestras de aceite en servicio obtenidas de un camión.	67
Figura 12 Espectros FTIR del aceite base y de muestras de aceite en servicio.	69

Figura 13 Comparación de los espectros FTIR del aceite base sin contaminar y de muestras con adición progresiva de agua.	83
Figura 14 Comparación de los espectros FTIR del aceite base sin contaminar y de muestras con adición progresiva de combustible diésel.	84
Figura 15 Comparación de los espectros FTIR del aceite base sin contaminar y de muestras con adición progresiva de glicol.	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación API para aceites de motor diésel y sus aplicaciones.	33
Tabla 2. Regiones espectrales FTIR consideradas para el análisis del aceite lubricante (ASTM E2412).....	53
Tabla 3. Registro de muestras recolectadas (flota y almacenamiento).....	57
Tabla 4. Especificaciones técnicas del fabricante Valvoline Premium Blue 7800 Plus SAE 15W-40.	64
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos del aceite lubricante	74
Tabla 6. Comparación de propiedades promedio del aceite lubricante en motor y en almacenamiento mediante análisis FTIR.....	76
Tabla 7. Rangos de referencia internos propuestos para indicadores FTIR del aceite lubricante	77
Tabla 8. Criterios internos de aceptación del aceite lubricante según parámetros fisicoquímicos y tendencia de aditivos FTIR	78
Tabla 9. Preparación de mezclas de aceite lubricante con agua, diésel y refrigerante (50 g totales)	81

1. INTRODUCCION

La flota vehicular de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) opera principalmente en entornos urbanos, caracterizados por arranques frecuentes, ralentí prolongado, trayectos cortos y variaciones térmicas constantes. Estas condiciones incrementan la exigencia sobre el lubricante y pueden afectar su estabilidad química y física si no se cumplen adecuadamente los requisitos técnicos establecidos por el fabricante y las normas internacionales. Por ello, resulta indispensable evaluar el estado del aceite lubricante antes de su uso operativo, con el fin de minimizar los riesgos asociados a la degradación prematura y la contaminación.

El análisis fisicoquímico de aceites lubricantes constituye una herramienta clave en el mantenimiento predictivo, ya que permite obtener información confiable sobre el estado del lubricante y su aptitud para el servicio. Mediante la aplicación de técnicas de laboratorio normalizadas, como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la determinación del número ácido total (TAN) por titulación potenciométrica, la medición del contenido de agua mediante el método Karl Fischer y el conteo de partículas conforme a la norma ISO 4406, es posible evaluar parámetros críticos relacionados con la oxidación, la estabilidad química, la contaminación por humedad y partículas sólidas, y la limpieza del aceite.

La presente investigación tiene como propósito realizar la caracterización técnica de aceites de motor utilizados en la flota vehicular de la EMAC EP, con el objetivo de establecer una línea base de calidad del lubricante previa a su utilización en los motores. Para ello, se analizaron muestras de aceite lubricante multigrado SAE 15W-40 mediante ensayos fisicoquímicos normalizados, comparando los resultados obtenidos con las especificaciones del fabricante y con estándares técnicos internacionales definidos por organismos como ASTM, API, SAE e ISO.

Los resultados obtenidos permitirán disponer de valores de referencia internos que faciliten la toma de decisiones técnicas relacionadas con la selección, el almacenamiento y el uso de lubricantes, contribuyendo a optimizar la gestión del mantenimiento vehicular, a reducir la probabilidad de fallas mecánicas y a asegurar el uso eficiente de los recursos destinados al mantenimiento de la flota municipal.

2. PROBLEMA DE ESTUDIO

La gestión eficiente del mantenimiento vehicular es un factor determinante para la operatividad de entidades públicas como EMAC EP, cuya flota de 55 vehículos está sometida a condiciones de trabajo intensivas y variables. Uno de los elementos críticos en dicha gestión es el aceite de motor, cuya función va más allá de la lubricación e incluye la regulación térmica, la limpieza interna del motor y la protección anticorrosiva. Actualmente, el cambio de aceite se realiza en función de intervalos de kilometraje o tiempo definidos por el fabricante, sin considerar el estado real del lubricante ni las condiciones específicas de operación local, como tráfico urbano intenso, detenciones frecuentes o cargas térmicas elevadas (ASTM D445 International, 2017). Esta práctica impide verificar si el aceite mantiene aún sus propiedades funcionales o si ha sufrido una degradación acelerada, lo que puede derivar en fallas mecánicas evitables o en el reemplazo innecesario del fluido. La ausencia de una línea base técnica limita la toma de decisiones basadas en evidencia, al no contar con parámetros que definan la vida útil del aceite en servicio. Por ello, se requiere una caracterización técnico-analítica del lubricante, basada en métodos estandarizados como la medición de viscosidad (ASTM International, 2017), acidez, (ASTM D664 Internacional, 2018), oxidación y contenido de metales de desgaste, (ASTM D5185 International, 2018), con el fin de optimizar los recursos, reducir el impacto ambiental y mejorar la confiabilidad operativa de la flota.

2.1 Antecedentes

El análisis técnico de aceites lubricantes se ha consolidado como una herramienta esencial para los programas de mantenimiento basados en condición, debido a su capacidad para revelar el desgaste interno, la contaminación y la degradación del aceite antes de que se produzcan fallas mayores. Diversos autores reconocen que las propiedades químicas y físicas del lubricante cambian progresivamente durante la operación, lo que permite evaluar la salud del motor y del propio aceite mediante parámetros estandarizados (Totten, Handbook of Lubrication and Tribology, 2019).

La literatura internacional indica que la formulación del lubricante, incluida su base y sus aditivos, determina su desempeño frente a cargas térmicas, contaminación y procesos oxidativos. Mang y Dresel describen que la estabilidad de la viscosidad y la resistencia a la oxidación son claves para conservar la protección del motor bajo ciclos severos de trabajo (Mang, Lubricants and Lubrication (3rd ed.), 2017), De manera similar, Mortier y colaboradores explican que la degradación del aceite se ve influenciada por factores como la presencia de agua, el hollín y la pérdida de inhibidores químicos, los cuales pueden identificarse mediante técnicas de laboratorio como FTIR, TAN, ICP y Karl Fischer (Mortier, Chemistry and Technology of Lubricants (3rd ed.), 2010).

Las normas internacionales también han aportado lineamientos fundamentales para el análisis del lubricante. Entre ellas destacan ASTM D445 para la medición de viscosidad, ASTM D664 para el número ácido total y ASTM D5185 (Labs., 2024) para la detección de metales por espectrometría ICP (International A. , ASTM D445-21e2, 2018), Asimismo, la ISO 4406 (International., ASTM, 2018), propone un sistema para clasificar el nivel de limpieza del aceite mediante conteo de partículas, parámetro crítico en flotas expuestas a polvo y ambientes urbanos (4406, 2021).

En cuanto a metodologías avanzadas, estudios recientes integran técnicas químicas y análisis estadísticos multivariados para mejorar la interpretación del estado del lubricante. Investigaciones como la de Ramirez Camba y colaboradores muestran que la combinación de ICP, FTIR y métodos de análisis de tendencias mejora la identificación de desgaste anormal y degradación acelerada del aceite (Ramirez Camba R. G., An integrated methodological approach for interpreting used oil analysis in diesel engines. *Lubricants*, *Lubricants*, 13(4), 169., 2025). Otros trabajos demuestran que la viscosidad a alta temperatura (HTHS) influye directamente en el desgaste del motor, especialmente en flotas sometidas a operaciones variables o con ciclos repetitivos de arranque y detención (Brown, 2015).

En contextos latinoamericanos, se ha documentado que las condiciones operativas urbanas incrementan la formación de hollín y aceleran el deterioro del lubricante, lo que evidencia la necesidad de establecer líneas base ajustadas a la realidad local y no solo a las especificaciones del fabricante (Hernández, 2023).

En el caso específico de la ciudad de Cuenca y de la empresa EMAC EP, existen estudios que han analizado el comportamiento del aceite en sus vehículos recolectores. Espinoza Segarra desarrolló uno de los primeros trabajos orientados a evaluar la degradación del lubricante mediante parámetros como viscosidad, TBN y TAN y metales de desgaste, demostrando que la operación severa típica de la empresa demanda un monitoreo continuo para evitar fallas prematuras (Espinoza Segarra, 2012). Años después, Marín Niveló y Pesántez Sánchez elaboraron una herramienta informática para organizar los resultados del análisis de aceite en la institución, aunque identificaron que aún no existía una línea base técnica formalizada para la calidad del lubricante almacenado (Marín Niveló & Pesántez Sánchez, 2022).

En conjunto, los antecedentes evidencian que el análisis fisicoquímico del aceite es una herramienta indispensable para garantizar la disponibilidad de la flota de EMAC EP. Además, muestran claramente la necesidad de establecer rangos propios de referencia que respondan a las condiciones reales de operación de la empresa, permitiendo tomar decisiones técnicas más precisas sobre uso, reprocesamiento o descarte del lubricante.

2.2 Importancia y Alcances

El análisis de aceite se ha convertido en una herramienta estratégica para el mantenimiento predictivo de motores de combustión interna, de sistemas hidráulicos y de maquinaria pesada. En instituciones públicas como EMAC EP, donde los equipos operan bajo ciclos severos de recolección de residuos, transporte continuo y servicio urbano, esta técnica permite reemplazar modelos reactivos por esquemas basados en condiciones, reduciendo fallas inesperadas y mejorando la disponibilidad operativa. Tal como señalan organizaciones internacionales especializadas, el monitoreo periódico del lubricante puede disminuir hasta en un 30% los costos globales del mantenimiento (Engineers., 2022).

La importancia de esta investigación también radica en que el análisis de aceite permite identificar desgastes incipientes, contaminación interna, fallas del sistema de refrigeración, degradación del paquete de aditivos y pérdidas de viscosidad antes de que se conviertan en averías costosas. Esto resulta fundamental para extender la vida útil de los motores institucionales y fortalecer la toma de decisiones basadas en datos, elemento clave para la sostenibilidad operativa y ambiental de una empresa municipal.

La presente investigación comprende:

2.3 Evaluación técnica de parámetros del lubricante

El estudio analiza parámetros críticos como viscosidad, TBN, TAN, concentración de metales de desgaste, oxidación, nitración, contenido de agua y conteo de partículas, utilizando metodologías de las normas ASTM e ISO aplicadas a motores de la flota institucional. El diagnóstico se basa en pruebas reguladas por estándares reconocidos internacionalmente (International., ASTM D445-21: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids., 2021) (Standardization., 2021), permitiendo generar tendencias y límites de alarma confiables.(Chen et al., 2026).

2.4 Aplicación del análisis de aceite como herramienta predictiva

Se interpretan los resultados fisicoquímicos y metalográficos para detectar fallas internas, como el desgaste de cojinetes, el ingreso de contaminantes, la degradación térmica del lubricante y problemas en el sistema de filtración. A través de la lectura de patrones de desgaste, es posible diferenciar procesos de fricción normal, de desgaste acelerado y condiciones operativas fuera de rango.

2.5 Construcción de una línea base

La información generada establece una referencia técnica ajustada a las condiciones reales de servicio de la flota municipal, lo que permitirá definir intervalos de cambio más adecuados, reducir el consumo de aceite, minimizar residuos y mejorar la confiabilidad mecánica en general (Totten, Handbook of Lubrication and Tribology (3.^a ed.), 2019).

2.6 Propuesta de optimización del programa de mantenimiento

El estudio plantea recomendaciones para reforzar el monitoreo periódico, automatizar el seguimiento de los resultados, definir umbrales de intervención y mejorar la toma de decisiones basada en la condición real del equipo.(Chen et al., 2026).

2.7 Delimitación

La presente investigación se delimita al análisis técnico del aceite lubricante SAE 15W-40 API CK-4 utilizado en la flota vehicular de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), centrada en la caracterización fisicoquímica del lubricante nuevo almacenado en la bodega institucional. El estudio se desarrolló en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, durante el periodo septiembre–diciembre de 2025, y analizó 15 muestras representativas provenientes de distintos lotes del aceite.

La investigación se circunscribe al uso de técnicas de laboratorio normadas según los métodos ASTM (D445, D664, D2896, D6304, D5185 y E2412), complementadas con las especificaciones del fabricante Valvoline Premium Blue 7800 Plus y con los estándares SAE J300 y API CK-4. Metodológicamente, el estudio adopta un enfoque descriptivo, analítico y experimental de laboratorio, orientado a establecer criterios objetivos de calidad del lubricante previos a su uso operativo.

Se excluyen del alcance la evaluación del desempeño del aceite en motores en funcionamiento, las simulaciones térmicas, las mediciones de campo, los análisis estadísticos avanzados y el análisis de lubricantes distintos a los registrados en el inventario de EMAC EP durante el periodo de estudio.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Caracterizar técnicamente los aceites de motor utilizados en la flota vehicular de EMAC EP mediante análisis fisicoquímicos normalizados, con el fin de establecer una línea base de calidad que permita evaluar su aptitud antes del uso operativo.

3.2 Objetivos Específicos

- Revisar y sistematizar los fundamentos técnicos en el marco teórico sobre la composición, las funciones y los mecanismos de degradación de los lubricantes de motor, así como las metodologías analíticas normalizadas para su evaluación.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos relevantes para evaluar la calidad del lubricante, utilizando técnicas de laboratorio como la espectroscopía FTIR, la titulación potenciométrica (TAN), la determinación de agua con Karl Fischer (agua) y el conteo de partículas.
- Comparar los resultados obtenidos en los análisis con las especificaciones del fabricante y los estándares técnicos aplicables para verificar el cumplimiento de los criterios de calidad.
- Establecer rangos de referencia internos que definan una línea base técnica para la aceptación, reprocesamiento o el descarte de aceites de motor almacenados, ajustados a las condiciones locales de almacenamiento y uso.

4. CAPÍTULO 1: REVISIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.

En este capítulo se presentan los fundamentos esenciales que sustentan el comportamiento de los lubricantes automotrices, abordando la composición de base del aceite 15W-40 Valvoline Premium Blue EMAC, la función de los diferentes aditivos y las propiedades que determinan su desempeño en condiciones reales de funcionamiento. Asimismo, se explican los procesos de degradación más frecuentes, entre ellos la oxidación, la contaminación por agentes externos y la pérdida progresiva de componentes protectores, fenómenos que inciden directamente en la eficiencia del motor, así como las principales metodologías analíticas utilizadas en laboratorios especializados para evaluar el estado del lubricante, como la Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) acorde a la normativa correspondiente, detección de metales de desgaste, la medición de viscosidad.

Finalmente, se presenta una revisión sistemática de la bibliografía existente, en relación con el análisis técnico y científico de aceites, tanto a nivel académico como industrial. Este marco de referencia permite situar la presente investigación en el contexto actual de la ingeniería automotriz, destacando la importancia de aplicar técnicas de análisis confiables en instituciones públicas, donde la disponibilidad vehicular, la gestión eficiente de recursos y las decisiones basadas en datos son elementos clave para la sostenibilidad operativa.

4.1 Composición y Clasificación de Aceites de Motor

Los aceites de motor actuales son formulaciones altamente especializadas cuyo propósito es proteger los componentes internos frente al desgaste, la fricción, la oxidación y la contaminación generada durante el funcionamiento del motor. Estos lubricantes se componen esencialmente de una base, que puede ser mineral, sintética o semisintética, y de un paquete de aditivos que aportan estabilidad térmica, limpieza y protección química. La combinación adecuada de estos dos elementos define la capacidad del aceite para mantener su viscosidad, resistir esfuerzos de cizallamiento y conservar sus propiedades durante los ciclos de operación, prolongando así la vida útil del motor. (Antony Jose et al., 2025).

La base lubricante representa entre el 70 % y el 90 % del total del lubricante. En particular, las bases sintéticas de los grupos III y IV destacan por su elevada resistencia a la oxidación y por mantener una fluidez estable incluso en arranques a bajas temperaturas. En el caso específico de las bases del grupo IV, formuladas a partir de polialfaolefinas (PAO), su desempeño sobresale debido a su excelente estabilidad térmica y su notable resistencia a la degradación por oxidación (Zhou et al., 2024)

El paquete de aditivos constituye la parte funcional de la mezcla. Dentro de estos se incluyen detergentes, dispersantes, antioxidantes, modificadores de viscosidad, compuestos antidesgaste como el dialquilditiofosfato de zinc (ZDDP), inhibidores de corrosión y agentes antiespumantes. El sistema detergente dispersante, en particular, desempeña un papel esencial al evitar la formación de depósitos y mantener en suspensión los subproductos de combustión (Han, 2024).

Respecto a su clasificación, la norma SAE J300 establece los límites reológicos que permiten categorizar los aceites lubricantes según su comportamiento a bajas y altas temperaturas. En este marco, un aceite multigrado 15W-40 debe cumplir

simultáneamente con los requisitos de viscosidad en frío del grado “15W”, garantizando una fluidez adecuada durante el arranque del motor, y con los límites de viscosidad cinemática a 100 °C correspondientes al grado “40”, los cuales aseguran la estabilidad del lubricante bajo condiciones de operación térmica elevadas. La norma determina que los aceites SAE 40 deben presentar una viscosidad entre 12.5 y 16.3 cSt a 100 °C, rango que permite conservar la película lubricante y prevenir el contacto metal-metal cuando el motor está en plena carga. De este modo, la clasificación SAE 15W-40 describe a un lubricante capaz de responder adecuadamente tanto en arranques en frío moderados como en el funcionamiento prolongado a altas temperaturas, proporcionando un desempeño equilibrado que responde a las necesidades de motores diésel como los utilizados en la flota de EMAC EP. (*Engine Oil Viscosity Classification*, 2015).

Adicionalmente, los aceites se clasifican según su desempeño mediante normas como las de API y ACEA. En esta línea, la categoría API CI-4 fue creada para motores diésel sometidos a condiciones severas, priorizando el control del hollín, la oxidación y el desgaste, especialmente en motores con sistemas EGR (Al Sheikh Omar et al., 2021).

4.2 Clasificación API para aceites de motor diésel y sus aplicaciones

La clasificación API para aceites de motores diésel establece categorías en función del nivel tecnológico del motor, de los sistemas de control de emisiones y de las condiciones de operación. Las categorías más recientes, como CK-4 y CJ-4, están diseñadas para motores modernos equipados con sistemas EGR, DPF y SCR, garantizando protección frente a la oxidación, el desgaste y el control del hollín, mientras que las categorías anteriores han sido declaradas obsoletas debido a su incompatibilidad con motores diésel modernos y normativas ambientales actuales (American Petroleum Institute, 2023; Manuel & Segarra, 2012), esta clasificación se resume en la Tabla 1.

Tabla 1.

Clasificación API para aceites de motor diésel y sus aplicaciones.

Clasificación API	Estado	Tipo de Servicio	Aplicación y características técnicas (Resumen)
CK-4	Actual	Motores diésel modernos (alta velocidad, 4 tiempos, EGR, DPF, SCR)	Máxima protección contra la oxidación, el hollín, la pérdida de viscosidad por cizallamiento y el desgaste. Cumple con los estándares de emisiones de 2017 y posteriores. Superior a CJ-4, CI-4 y CH-4.
CJ-4	Actual	Motores con DPF y emisiones EPA 2007	Bajo contenido de cenizas (Low-SAPS). Protege los sistemas de postratamiento y controla el hollín.
CI-4	Actual	Motores con EGR (2002)	Diseñado para combustibles hasta 0.5% azufre; buena estabilidad térmica y control de hollín.
CH-4	Actual	Motores EPA 1998	Resiste la oxidación y los depósitos; para combustibles con hasta 0,5 % de azufre.
CG-4	Obsoleto	Motores carretera 1994	Precaución: No apto para la mayoría de motores posteriores a 2009.
CF-4	Obsoleto	Motores sobrecargados (1991)	Precaución: No apto para motores diésel modernos posteriores a 2009.
CF-2	Obsoleto	Motores diésel 2 tiempos	Precaución: No apto para la mayoría de motores modernos.
CF	Obsoleto	Motores diésel antiguos	Precaución: Solo adecuado para motores muy antiguos o de dos tiempos específicos.
CE	Obsoleto	Maquinaria pesada (1987)	No apto para motores fabricados después de 1994.
CD-II	Obsoleto	Motores diésel severos	No apto para motores diésel posteriores a 1994.
CD	Obsoleto	Motores aspirados y turboalimentados (1955)	No apto para motores posteriores a 1994.
CC	Obsoleto	Motores moderados a severos (1955)	No apto para motores posteriores a 1990.

Clasificación API	Estado	Tipo de Servicio	Aplicación y características técnicas (Resumen)
CB	Obsoleto	Trabajo liviano (1949)	No apto para motores posteriores a 1961.
CA	Obsoleto	Trabajo liviano (1940s)	No apto para motores posteriores a 1959.

Nota. Elaboración propia basada en información del American Petroleum Institute (API), documentación técnica de clasificación API y tablas históricas de categorías para motores diésel.(American Petroleum Institute, n.d.).

Finalmente, diversos estudios técnicos resaltan que los aceites sintéticos 15W-40 permiten extender los intervalos de cambio, mejorar la eficiencia operativa y disminuir los costos de mantenimiento, especialmente en flotas urbanas. Se ha demostrado que estos lubricantes pueden prolongar los periodos de drenaje hasta en un 50 %, reduciendo la aparición de fallas asociadas al desgaste prematuro (*Totten et al., 2019*).

4.3 Funciones del lubricante en el motor

El aceite de motor cumple múltiples funciones dentro del sistema mecánico:

- **Lubricar y reducir la fricción entre superficies metálicas en movimiento.** El aceite de motor desempeña un conjunto de funciones esenciales que garantizan la operación eficiente, estable y segura del sistema mecánico. Su actuación no se limita a lubricar, sino que interviene directamente en el control térmico, la protección química y la limpieza interna del motor. A continuación, se detallan las principales funciones con un enfoque técnico aplicado a motores de combustión interna. (Mang, *Lubricants and Lubrication*, 2017).

- **Disipar el calor generado por la combustión y la fricción.** El lubricante crea una película hidrodinámica entre las superficies metálicas en movimiento, como cojinetes, cilindros, árboles de levas y trenes de válvulas, lo que disminuye el contacto directo entre metales. Esta película evita el desgaste abrasivo y adhesivo, reduciendo la fricción mecánica y las pérdidas de energía. En motores modernos, esta función es crucial para mantener la eficiencia termodinámica, minimizar el desgaste inicial durante el arranque en frío y asegurar un régimen de operación estable a altas cargas,(Barazzutti et al., 2023).
- **Prevenir la formación de lodos y lacas.** El aceite incorpora aditivos detergentes y dispersantes que mantienen en suspensión los residuos de combustión, evitando que se adhieran a las superficies internas del motor. Cuando estos contaminantes no se controlan, se forman lodos, barnices o lacas que pueden obstruir los pasos de lubricación, aumentar la fricción y comprometer el funcionamiento de anillos y válvulas. La acción química del detergente neutraliza los ácidos formados durante la combustión, mientras que los dispersantes evitan la aglomeración de partículas sólidas y mantienen la limpieza del sistema.(Ahmed et al., 2016).
- **Proteger contra la corrosión.** La mezcla de humedad, gases de combustión y temperaturas elevadas crea un entorno propicio para la corrosión interna. El lubricante contiene inhibidores que forman una barrera protectora sobre los metales, evitando la acción corrosiva de los ácidos y de los subproductos químicos generados durante la operación del motor. Además, los antioxidantes retrasan la reacción del aceite con el oxígeno, lo que prolonga su vida útil, reduce el espesamiento por oxidación y asegura la estabilidad del lubricante durante ciclos prolongados.(Alimova et al., 2021).
- **Sellar los espacios entre los pistones y los cilindros:** El aceite contribuye al sellado dinámico entre los anillos del pistón y la pared del cilindro, evitando fugas de gases

de combustión al cárter (blow-by). Este sellado mejora la eficiencia del motor, mantiene la compresión adecuada y reduce la contaminación por gases no deseados generados por los tipos de aceite. En motores envejecidos o con desgaste excesivo, esta función resulta crítica para evitar pérdidas de potencia y un consumo de aceite elevado (Al Sheikh Omar et al., 2022).

- **Transportar partículas y contaminantes hacia el filtro.** Durante su circulación, el lubricante arrastra partículas metálicas, residuos de combustión, polvo y otras impurezas hacia el filtro de aceite, donde quedan retenidas. Este proceso evita que estos contaminantes circulen libremente y provoquen desgaste abrasivo en superficies críticas dentro del cárter o motor. Un sistema de lubricación en buen estado permite que el flujo de aceite mantenga una velocidad de arrastre adecuada, garantizando la remoción continua de los contaminantes del circuito. (Hernández Battez, 2012). Un aceite en buen estado, limpio y seco, asegura una operación eficiente y segura del motor. Por el contrario, un lubricante degradado o contaminado puede comprometer gravemente el funcionamiento del sistema.

4.4 Mecanismos de Degradación del Aceite

Durante su operación, el aceite se somete a condiciones que lo deterioran. Los principales mecanismos de degradación son:

- **Oxidación térmica:** La oxidación es uno de los procesos más determinantes del envejecimiento del lubricante. Ocurre cuando las moléculas del aceite reaccionan con el oxígeno, lo que se acelera a temperaturas superiores a 90 °C. A nivel químico, se forman peróxidos, ácidos orgánicos y polímeros que aumentan la viscosidad y favorecen la formación de lodos y barnices. Factores como altas

cargas de trabajo, mala disipación térmica o funcionamiento prolongado en ralentí intensifican este proceso. Esta oxidación también provoca una disminución progresiva del TBN y un incremento del TAN, indicadores clave para evaluar el estado del lubricante durante el análisis de laboratorio (Mang, Lubricants and Lubrication, 2017).

- **Contaminación:** El aceite puede contaminarse por múltiples fuentes. El ingreso de agua por condensación, empaques defectuosos o fallas en el sistema de refrigeración provoca emulsificación y acelera la corrosión. La contaminación por hollín en motores diésel incrementa la viscosidad y deteriora la capacidad detergente-dispersante del aceite. A esto se suma la entrada de polvo o partículas minerales, especialmente en flotas urbanas expuestas a trabajos continuos en ambiente seco, como las de recolección de residuos. La contaminación también puede provenir del propio motor, como restos de combustión, blow-by, residuos de aditivos degradados o combustibles no quemados que diluyen el aceite.(Pashukevich, 2022).
- **Pérdida de aditivos:** Los aditivos cumplen funciones críticas como evitar la oxidación, controlar la corrosión, mejorar la viscosidad y reducir el desgaste. Sin embargo, durante la operación, se consumen de forma gradual (Nagarajan et al., 2022). Los antioxidantes se agotan al reaccionar con radicales libres; los detergentes y dispersantes pierden efectividad al saturarse con contaminantes; y los aditivos antidesgaste, como el ZDDP. Este agotamiento disminuye la capacidad del aceite para proteger superficies metálicas, lo que se refleja en aumentos de desgaste y pérdida de estabilidad térmica. (Wong & Tung, 2016).
- **Dilución:** Ocurre cuando parte del combustible no se quema por completo y migra al cárter. Este fenómeno reduce la viscosidad del lubricante, disminuye su espesor

de película y puede provocar un desgaste acelerado en cojinetes y cilindros. Es más común en motores que operan en ciclos cortos, con frecuentes arranques en frío o en ralentí prolongado, como sucede en flotas municipales de operación continua.(Tormos et al., 2019).

- **Desgaste metálico:** El desgaste mecánico produce partículas metálicas provenientes de cojinetes, cilindros, anillos, árboles de levas y del sistema de distribución. Estas partículas, aunque microscópicas, catalizan reacciones de oxidación y aceleran aún más la degradación del lubricante.

Los metales comúnmente detectados en análisis de aceite hierro, cobre, cromo, aluminio y plomo permiten identificar el origen del desgaste y ayudan a la predicción de fallas(Niculescu et al., 2024). La acumulación de estos elementos también altera la estabilidad del aceite, incrementa el coeficiente de fricción y puede afectar la correcta lubricación hidrodinámica. Estos factores alteran propiedades clave como la viscosidad, el número ácido total (TAN), el número básico total (TBN), y el contenido de metales, entre otros.

4.5 Técnicas Analíticas para la Evaluación de Aceites

La evaluación fisicoquímica del aceite lubricante es una herramienta esencial para garantizar la calidad del producto antes de su uso en motores de flota. Mediante metodologías estandarizadas basadas en las normas ASTM e ISO, es posible determinar parámetros clave como la oxidación, la viscosidad, la presencia de partículas y la estabilidad química del lubricante. Estos indicadores permiten verificar si un aceite nuevo almacenado mantiene sus propiedades originales o si ha sufrido alteraciones durante el almacenamiento. Según Ramírez et al., la interpretación adecuada de los resultados analíticos facilita establecer valores de referencia que sirven como línea base para

comparar futuros lotes, identificar desviaciones tempranas y garantizar que el lubricante utilizado cumpla con los requisitos técnicos del fabricante y las condiciones operativas de la maquinaria (Ramirez Camba et al., 2025). Este enfoque asegura que la flota inicie su operación con un aceite en condiciones óptimas, reduciendo el riesgo de fallas asociadas a lubricantes fuera de especificación.

Algunas de las técnicas más utilizadas incluyen:

- **Viscosidad cinemática (ASTM D445):**

La viscosidad es uno de los parámetros más importantes del lubricante, ya que determina su capacidad para formar una película resistente entre las superficies metálicas. El método ASTM D445 mide la viscosidad cinemática a temperaturas controladas (40 °C y 100 °C), lo que permite detectar el adelgazamiento por dilución con combustible, el espesamiento por oxidación y la contaminación por hollín. Estas variaciones influyen directamente en el rendimiento del motor y en la capacidad del aceite para proteger los componentes internos. (International., ASTM International. , 2021).

Como se observa en la Figura 1 la determinación de la viscosidad cinemática se realiza mediante un equipo automatizado de medición que controla de manera precisa la temperatura de la muestra y el tiempo de flujo del lubricante. Este tipo de instrumento permite obtener resultados confiables y repetibles, asegurando el cumplimiento de las condiciones establecidas por la norma ASTM D445. La utilización de equipos automatizados reduce la incertidumbre del ensayo y facilita la comparación de los valores obtenidos con los rangos normativos definidos para aceites multigrado, como el SAE 15W-40, lo que contribuye a establecer una línea base de calidad del lubricante previa a su uso operativo.

Figura 1

Analizador automático de viscosidad.



Nota. Imagen referencial de un analizador automático de viscosidad. Tomado de: (Eralytics ERAVISC X, Medidor de Viscosidad y Densidad 2 En 1 Con Precisión de Laboratorio | Parkes Scientific, n.d.).

- **Número ácido total (TAN, ASTM D664) y número básico (ASTM D2896):**

El TAN es un indicador directo del grado de oxidación y degradación química del lubricante. A medida que el aceite envejece, se forman compuestos ácidos que incrementan este valor. El método ASTM D664 permite cuantificar dichos ácidos mediante titulación potenciométrica. Un aumento sostenido del TAN suele asociarse a procesos de oxidación térmica, al agotamiento de antioxidantes y a la contaminación por combustión incompleta, lo que puede comprometer la estabilidad del aceite y acelerar el desgaste de superficies metálicas.(ASTM International, 2023).

Como se observa en la Figura 2, la determinación del TAN y del TBN se realiza mediante un equipo de titulación automatizado que permite controlar con precisión el proceso de titulación y registrar de forma confiable el punto final de la reacción. Este tipo de instrumentación garantiza resultados reproducibles y comparables, y es fundamental para establecer una línea base química del lubricante antes de su uso operativo y para el posterior monitoreo de su condición, conforme a los métodos ASTM D664 y ASTM D2896.(Dutta et al., 2021).

Figura 2

Equipo de titulación (TAN) y del número básico (TBN).



Nota. Imagen referencial de un equipo de titulación. Tomado de: (Eco Coulometer Con Electrodo Generador Con Diafragma | Metrohm, n.d.).

- **Contenido de agua (ASTM D6304).**

El agua es uno de los contaminantes más dañinos para los lubricantes, ya que favorece la corrosión, genera emulsiones y acelera la degradación de los aditivos. La norma ASTM D6304, basada en el método de titulación coulométrica de Karl Fischer, permite detectar concentraciones muy bajas de humedad. La presencia de agua puede provenir de la condensación, de fallas en el sistema de refrigeración o del ingreso externo,

por lo que su monitoreo constante es clave en motores sometidos a ciclos térmicos frecuentes. (West, 2020).

Como se observa en la Figura 3, la determinación del contenido de agua se realiza mediante un sistema automatizado de titulación Karl Fischer, lo que garantiza condiciones de medición controladas y resultados reproducibles. Este tipo de equipo permite cuantificar con exactitud la humedad del aceite, asegurando que el lubricante cumpla con los límites recomendados y contribuyendo al establecimiento de una línea base de calidad para la flota vehicular analizada.

Figura 3

Equipo Karl Fischer Metrohm 851/801 utilizado para la determinación de contenido de agua según ASTM D6304.



Nota. Imagen referencial de un equipo Karl Fischer Metrohm. Tomado de: (ASTM D6304: Determinación Más Fácil de La Humedad En Productos Derivados Del Petróleo | Metrohm, n.d.).

- **Espectroscopía infrarroja FTIR:**

La técnica FTIR permite identificar grupos funcionales formados durante los procesos de oxidación, degradación térmica y contaminación. Mediante el análisis del espectro infrarrojo, es posible detectar compuestos como carbonilos, nitratos, sulfatos, glicoles, hollín y productos de degradación del paquete de aditivos. Esta prueba es especialmente útil para establecer tendencias en el envejecimiento del lubricante y

evaluar la presencia de contaminantes que no siempre se detectan con métodos tradicionales. (Santana et al., 2022).

Como se observa en la Figura 4, el análisis FTIR se realiza mediante un equipo automatizado que registra el espectro infrarrojo del aceite lubricante, lo que permite identificar variaciones químicas asociadas a procesos de oxidación, nitración y sulfatación.

Figura 4

Analizador FTIR ERASPEC Oil utilizado para la evaluación química del aceite lubricante y la detección de procesos de oxidación, nitración y sulfatación conforme a la norma ASTM E2412.



Nota. Imagen referencial FTIR ERASPEC Oil. Tomado de:(Eralytics ERASPEC FUEL, Analizador de Combustible FTIR | Parkes Scientific, n.d.).

La utilización de este tipo de analizadores facilita la comparación de los resultados obtenidos con valores de referencia y contribuye al establecimiento de una línea base química del lubricante previo a su uso operativo, conforme a los lineamientos establecidos en la norma (van de Voort, 2022).

- **Espectrometría ICP (ASTM D5185):**

El método ASTM D5185 evalúa la concentración de elementos metálicos y aditivos presentes en el aceite mediante espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP). La detección de metales como hierro, cobre, plomo, aluminio o cromo permite identificar el origen del desgaste interno en cojinetes, cilindros, anillos, camisas, árbol de levas, entre otros. Asimismo, el análisis de los elementos presentes en los aditivos, como zinc, calcio o fósforo, ayuda a determinar la estabilidad del paquete lubricante. (International A. , 2018).

Como se observa en la Figura 5, el análisis ICP-OES se realiza mediante un equipo de laboratorio automatizado que emplea un plasma de alta temperatura para excitar los elementos presentes en la muestra de aceite, lo que permite cuantificarlos en concentraciones del orden de partes por millón. Este tipo de instrumentación ofrece alta sensibilidad y precisión analítica, y es fundamental para establecer una línea base elemental del lubricante antes de su uso operativo, así como para comparaciones futuras durante el monitoreo del aceite en servicio, conforme a la norma ASTM D5185.(Kakuk et al., 2025).

Figura 5

Equipo ICP-OES utilizado para la determinación de metales de desgaste, contaminantes y aditivos en aceites lubricantes, según la norma ASTM D5185.



Nota. Imagen referencial del equipo ICP-OES. Tomado de: (Eralytics ERACOUNT XS, El Contador de Partículas ISO 4406 Más Rápido | Parkes Scientific, n.d.).

- **Conteo de partículas (ISO 4406):**

La norma ISO 4406 establece el código de limpieza del lubricante tomando como referencia la cantidad de partículas sólidas por mililitro. Este análisis permite clasificar el nivel de contaminación según el tamaño de partícula ($4\ \mu\text{m}$, $6\ \mu\text{m}$ y $14\ \mu\text{m}$). El conteo de partículas es fundamental para evaluar la eficiencia del sistema de filtrado y detectar condiciones anómalas de desgaste o de ingreso de polvo en motores sometidos a operaciones severas, como los vehículos urbanos de servicio continuo.

Como se observa en la Figura 6, el análisis de limpieza del lubricante se realiza mediante un contador automático de partículas que permite cuantificar de manera rápida y precisa la distribución de partículas sólidas presentes en el aceite. Este tipo de equipo facilita la clasificación del lubricante conforme al código ISO 4406, proporcionando información clave para evaluar la condición del aceite antes de su uso operativo y

establecer una línea base de limpieza para la flota vehicular analizada. (International Organization for Standardization [ISO], 2021).

Figura 6

Contador automático de partículas Eralytics ERACOUNT XS utilizado para la clasificación de limpieza del lubricante según ISO 4406.



Nota. Fuente: Kaycanlab (s.f.). Portable liquid particle counter [Fotografía]. Kaycanlab. <https://es.kaycanlab.com/product/portable-liquid-particle-counter>.

El análisis de viscosidad, TAN, contenido de agua, FTIR, ICP y conteo de partículas permite establecer una línea base específica para las condiciones de operación de la flota, lo cual es esencial para un mantenimiento predictivo eficiente. Estos resultados también ayudan a optimizar los intervalos de cambio, reducir los costos operativos y evitar fallas catastróficas asociadas a la lubricación inadecuada. y establecer una línea base técnica adaptada a las condiciones locales de operación. ((ISO)., 2021).

4.6 Principios operativos y ventajas del análisis de aceite

El análisis de aceite se sustenta en una combinación estructurada de pruebas fisicoquímicas y metalográficas que permiten interpretar con precisión los cambios experimentados por el lubricante y la maquinaria que protege. Mediante ensayos como la

viscosidad, los índices TAN/TBN, el contenido de agua, el análisis FTIR, la espectrometría ICP y el conteo de partículas, es posible establecer un diagnóstico integral del comportamiento del lubricante en servicio. Estas mediciones, cuando se analizan sobre series temporales, permiten detectar tendencias anómalas que pueden anticipar una falla antes de que esta sea perceptible en la operación. Por ejemplo, aumentos sostenidos en hierro, cobre o aluminio pueden indicar desgaste en cojinetes, tren de válvulas o superficies de fricción, mientras que un descenso acelerado del TBN advierte sobre pérdida de capacidad neutralizante frente a compuestos ácidos.

Como señalan manuales especializados, el análisis de aceite constituye un método para identificar señales tempranas de desgaste, contaminación o degradación, lo que brinda el tiempo suficiente para programar labores correctivas y evitar daños mayores (Ramirez Camba, 2025).

Las ventajas prácticas que justifican su uso en flotas municipales o institucionales incluyen:

- **Identificación precoz del desgaste interno**, lo que permite abordar fallas en cojinetes, bombas, pistones o cámaras de combustión antes de que progresen.
- **Ajuste óptimo de los intervalos de cambio**, reemplazando el lubricante según su condición real, disminuyendo el consumo de aceite y la generación de residuos.
- **Planificación estratégica de repuestos y de personal técnico, para reducir los tiempos de parada imprevistos.**
- **Apoyo en el análisis de causa raíz**, ya que combinar variables —como incrementos simultáneos de silicio y partículas grandes— permite inferir el ingreso de suciedad, fallas de sellado o problemas en el sistema de filtración.
- **Aumento de la disponibilidad del equipo**, particularmente en flotas sometidas a ciclos intensivos y arranques frecuentes, donde el desgaste tiende a acelerarse.

4.7 Estado del arte

La caracterización técnica de los aceites de motor ocupa un papel central en las estrategias modernas de mantenimiento predictivo para flotas, pues permite no solo evaluar la condición del lubricante, sino también detectar indicios tempranos de falla en los componentes internos. En el contexto de flotas municipales, como la de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), estos estudios aportan criterios objetivos para ajustar los intervalos de cambio, priorizar las intervenciones y disminuir los costos operativos y ambientales.

Los trabajos recientes derivados del estudio de (Ramirez Camba et al., 2025) evidencian una tendencia consolidada hacia la integración de técnicas analíticas clásicas incluyendo la medición de viscosidad, los análisis (TAN/TBN), el conteo de partículas, y las determinaciones espectroscópicas mediante (ICP) y (FTIR) con herramientas estadísticas multivariadas que permiten una interpretación más robusta del comportamiento del lubricante a lo largo del tiempo. En dicho estudio se analizaron 152 vehículos de la flota, lo que permitió observar patrones de degradación asociados a factores operativos y mecánicos.

Asimismo, investigaciones aplicadas específicamente a flotas urbanas, como la de (Wolak & Krasodowski, 2025), demostraron que la combinación de análisis elemental (ICP), espectroscopía FTIR (Wolak et al., 2021) y técnicas estadísticas avanzadas como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y la detección de puntos de cambio (change-point detection) facilitan la identificación de los mecanismos dominantes de degradación del lubricante y la definición de umbrales de alarma basados en la condición real del aceite en servicio, en lugar de emplear límites genéricos propuestos por el fabricante. Técnicas analíticas tradicionales y su valor complementario.

La literatura clásica y empírica ratifica la necesidad de emplear un conjunto de pruebas complementarias:

- **GC–MS / FTIR / NMR:** estudios comparativos entre aceites nuevos, usados y sometidos a intemperismo muestran cambios en el perfil de hidrocarburos y la aparición de compuestos oxidados (carbonilos, cetonas, ácidos) detectables por FTIR y NMR; GC–MS permite identificar productos de degradación específicos y compuestos aromáticos indicativos de envejecimiento o contaminación ambiental. Estos métodos son útiles para la caracterización química profunda y la validación de hipótesis sobre rutas de degradación. (Alemu et al., 2025).
- **ICP / espectrometría multielemental:** el análisis de metales en aceite (Fe, Cu, Al, Cr, Pb, etc.) es la técnica estándar para monitorizar el desgaste mecánico; los patrones relativos de metales permiten localizar el origen del desgaste (cojinetes, árbol de levas, cilindros). (Ramirez Camba R. G., 2025).

4.8 Estudios específicos en la EMAC EP

En el contexto ecuatoriano, (Espinoza Segarra, 2012) analizó la degradación de los lubricantes utilizados en los vehículos recolectores a diésel de la EMAC EP. Su investigación incluyó pruebas de viscosidad y TBN, así como el análisis de metales de desgaste, y concluyó que el monitoreo continuo del lubricante permitiría mejorar la eficiencia operativa y reducir el desgaste prematuro del motor. Este trabajo representa uno de los primeros esfuerzos locales para sistematizar la evaluación técnica del aceite de motor.

Más recientemente, desarrollaron una herramienta informática para sistematizar los resultados de los análisis de lubricantes de la flota de EMAC EP. La plataforma permitió correlacionar parámetros como la viscosidad y el kilometraje recorrido,

generando alertas técnicas y reportes históricos. A pesar de los avances, los autores señalaron la necesidad de establecer una línea base técnica que determine la calidad inicial del lubricante, un aspecto que aún no ha sido abordado formalmente en la empresa.(Manuel & Segarra, 2012).

5. CAPITULO 2: Determinar los parámetros fisicoquímicos relevantes para evaluar la calidad del lubricante, utilizando técnicas de laboratorio como la espectroscopía FTIR, la titulación potenciométrica (TAN), la determinación de agua con Karl Fischer (agua) y el conteo de partículas.

En el presente capítulo se describen los procedimientos experimentales y los resultados obtenidos a partir del análisis fisicoquímico del aceite lubricante SAE 15W-40 utilizado en la flota vehicular de la EMAC EP. Los ensayos realizados incluyen la determinación de viscosidad, el número ácido total (TAN), el contenido de agua mediante Karl Fischer, el conteo de partículas, el análisis elemental por ICP y la evaluación espectral mediante FTIR, conforme a las normas ASTM e ISO.(Fraenza et al., 2021).

5.1 Población, muestras y criterios de selección

La población de estudio estuvo conformada por aceites lubricantes de motor tipo SAE 15W-40 utilizados en la flota vehicular de la EMAC EP, tanto en condiciones de operación como de almacenamiento. A partir de esta población se trabajó con un total de 15 muestras de aceite, seleccionadas con base en criterios técnicos que permitieran evaluar el estado del lubricante y establecer una línea base de calidad.

Las muestras se agruparon en dos categorías principales:

- **Muestras de vehículos (motor):** aceite lubricante tomado directamente de unidades pertenecientes a la flota vehicular de la EMAC EP, debidamente identificadas

mediante placa, marca, modelo, kilometraje y horas de operación registradas al momento del muestreo.

- **Muestras de almacenamiento (tanque/barril):** aceite lubricante tomado de recipientes y lotes almacenados en las instalaciones de la EMAC EP, identificados mediante la fecha de muestreo y el código interno de control.

El procedimiento de toma de muestras se realizó siguiendo buenas prácticas de muestreo de aceites lubricantes, asegurando la limpieza de los puntos de extracción y de los recipientes utilizados, a fin de evitar la contaminación externa que pudiera afectar los resultados de los análisis posteriores.

En la Figura 7 se muestra el procedimiento de toma de muestras tanto en vehículos como en recipientes de almacenamiento, ilustrando los puntos de extracción y los elementos utilizados durante el muestreo.

Estas muestras permiten caracterizar el estado fisicoquímico del lubricante en condiciones reales de uso y almacenamiento, proporcionando información técnica fundamental para la evaluación de la calidad del aceite y para el establecimiento de una línea base de referencia.

Figura 7

Toma de muestras.



Nota. Procedimiento para la toma de muestras de aceite lubricante en vehículos de la flota y en recipientes de almacenamiento de la EMAC EP.

5.2 Criterios de análisis espectral FTIR según ASTM E2412

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se empleó como técnica fundamental para la determinación e interpretación de los parámetros fisicoquímicos del lubricante, debido a su capacidad para identificar procesos de degradación, contaminación externa y el estado del paquete de aditivos mediante el análisis de regiones espectrales específicas. El análisis se realizó conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM E2412, que define un enfoque de monitoreo basado en el análisis comparativo y tendencial de los espectros infrarrojos.

Para la interpretación de los resultados FTIR se estableció previamente un espectro de referencia o espectro base, correspondiente al aceite lubricante nuevo tipo SAE 15W-40 recolectado del sistema de almacenamiento de la EMAC EP (tanque/barril y manguera), antes de su uso en operación. Este espectro base representa la condición inicial del lubricante, libre de degradación significativa y de contaminación externa, y se

utilizó como punto de comparación para evaluar los cambios químicos observados en las muestras de aceite en servicio y durante el almacenamiento.

De acuerdo con la norma ASTM E2412, el análisis FTIR del aceite lubricante se realiza mediante la evaluación de regiones espectrales características, cada una asociada a procesos específicos de degradación, contaminación o al estado de los aditivos. En el presente estudio, las zonas espectrales analizadas se definieron previamente y se mantuvieron constantes en todas las muestras, garantizando una comparación objetiva y reproducible de los resultados. (*Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*, 2023a).

Tabla 2.

Regiones espectrales FTIR consideradas para el análisis del aceite lubricante (ASTM E2412)

Parámetro	Región espectral (cm⁻¹)	Asignación espectral
Agua	3500 – 3150	Banda ancha asociada al estiramiento del grupo hidroxilo (O–H), utilizada para la detección de contaminación por agua mediante el área integrada bajo la curva.
Hollín (Soot)	~2000	Incremento del desplazamiento de la línea base asociado a partículas carbonosas en suspensión, evaluado como absorbancia en torno a 2000 cm ⁻¹ .
Oxidación	1800 – 1670	Región asociada a la formación de grupos carbonilo (C=O) producto de la degradación oxidativa del aceite base.

Parámetro	Región espectral (cm⁻¹)	Asignación espectral
Nitración	1650 – 1600	Banda relacionada con compuestos nitrogenados derivados de la fijación de óxidos de nitrógeno durante la combustión.
Sulfatación	1180 – 1120	Región vinculada a la formación de sulfatos y subproductos de combustión, así como al consumo de aditivos detergentes.
Aditivos antidesgaste (ZDDP)	1025 – 960	Banda asociada a compuestos fosfatados, utilizada para evaluar la tendencia de agotamiento del aditivo antidesgaste.
Contaminación por diésel	815 – 805	Región característica de dilución por combustible diésel, relacionada con bandas aromáticas del combustible.
Contaminación por glicol (refrigerante)	1100 – 1030	Región asociada a enlaces C–O característicos de compuestos glicólicos, empleada para la detección de refrigerante en el aceite.

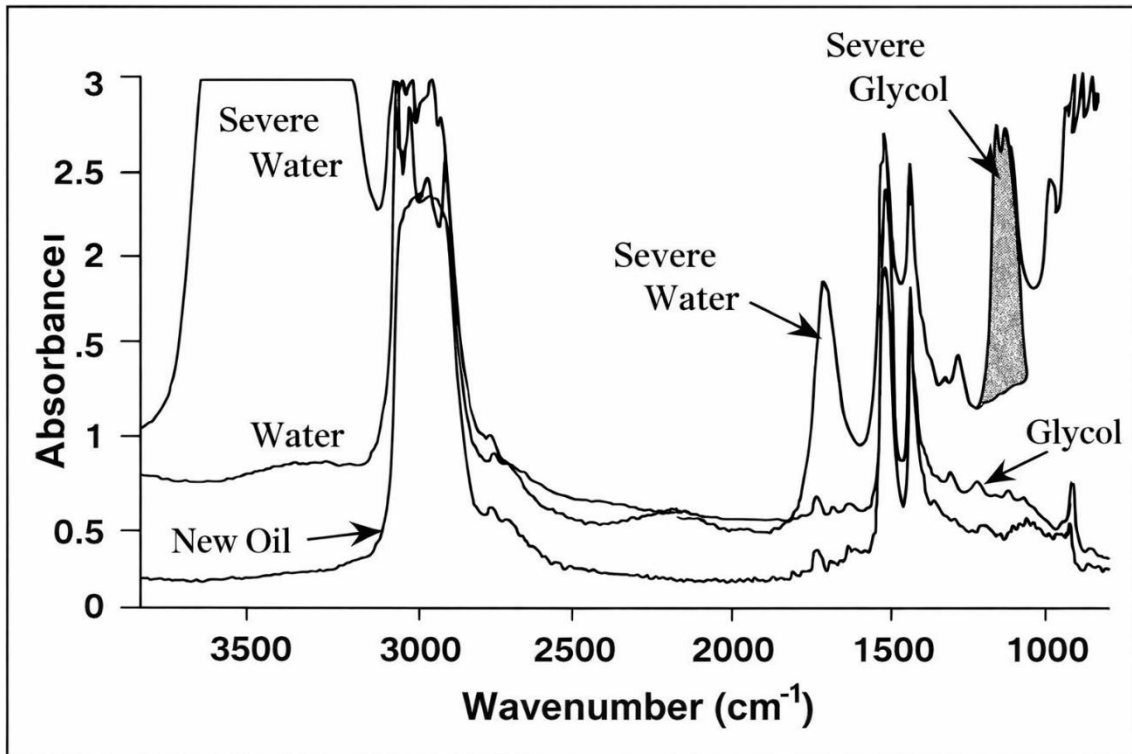
Nota. Regiones espectrales FTIR(Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry, 2010)

Cada una de estas regiones espectrales fue evaluada de manera comparativa con el espectro base, analizando incrementos o disminuciones de absorbancia que indicaran procesos de degradación del lubricante, la presencia de contaminantes o el consumo del paquete de aditivos. Este enfoque permite un diagnóstico fisicoquímico integral del aceite lubricante, basado en tendencias espectrales y no únicamente en valores absolutos.

En este sentido, la Figura 8 muestra la respuesta espectral FTIR de aceites lubricantes de acuerdo con la norma ASTM E2412, donde se identifican claramente las principales bandas asociadas a la presencia de agua, glicol y otros procesos de degradación. En el espectro se observa el comportamiento característico del aceite nuevo, así como el incremento de señales en regiones específicas cuando existe contaminación por agua o glicol, lo que permite establecer zonas espectrales de referencia para el análisis comparativo de las muestras evaluadas en el presente estudio. Esta figura sirve como base para interpretar los espectros obtenidos experimentalmente e identificar correctamente contaminantes y mecanismos de degradación del lubricante. (*Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*, 2023b).

Figura 8

Respuesta espectral FTIR de aceites lubricantes, de la norma ASTM E2412.



Nota. Figura adaptada de ASTM E2412: (Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry, 2010).

En este contexto, la Tabla 4 presenta el registro de las muestras de aceite recolectadas, tanto de la flota vehicular de la EMAC EP como de los sistemas de almacenamiento (tanques, barriles y mangueras). Para las muestras provenientes de vehículos en operación, se documentó información técnica relevante, como marca, modelo, placa, kilometraje y horas de operación, mientras que las muestras de almacenamiento fueron identificadas según su origen, al no estar asociadas directamente a unidades vehiculares. Esta caracterización inicial permitió establecer la trazabilidad de las muestras y sirvió de base para el análisis comparativo posterior de los resultados fisicoquímicos.

Tabla 3.

Registro de muestras recolectadas (flota y almacenamiento).

ORIGEN	MARCA/FECHA	MODELO	PLACA	Km	HORA S
Vehículo (motor)	KENWORTH	L700	AMA1105	375.548	12518.0
Vehículo (motor)	IVECO	TRAKKER380	AMA1499	121.474	5032.0
Vehículo (motor)	IVECO	TRAKKER380	AMA1499	129.445	5032.0
Vehículo (motor)	KENWORTH	L700	AMA1093	416.974	73291.0
Vehículo (motor)	KENWORTH	L700	AMA1094	258.349	31180.0
Vehículo (motor)	KENWORTH	L700	AMA1097	152.635	33770.0
Vehículo (motor)	KENWORTH	L700	AMA1097	162.124	31311.0
Vehículo (motor)	KENWORTH	L700	AMA1104	353.523	31311.0
Tanque/Barril (almacenamiento)	10/10/2025	—	—	—	—
tanque/Manguera (almacenamiento)	10/10/2025	—	—	—	—
Tanque/Barril (almacenamiento)	13/10/2025	—	—	—	—
Tanque/Manguera (almacenamiento)	13/10/2025	—	—	—	—
Tanque/Barril (almacenamiento)	23/10/2025	—	—	—	—
Tanque/Manguera (almacenamiento)	28/10/2025	—	—	—	—
Tanque/Barril (almacenamiento)	28/10/2025	—	—	—	—

Nota. Las muestras provenientes de *vehículo (motor)* corresponden a aceite en servicio, mientras que las muestras de *tanque/barril* y *manguera* corresponden a aceite nuevo recolectado del sistema de almacenamiento de la EMAC EP.

5.3 Espectros de referencia del aceite nuevo mediante ERASPEC OIL

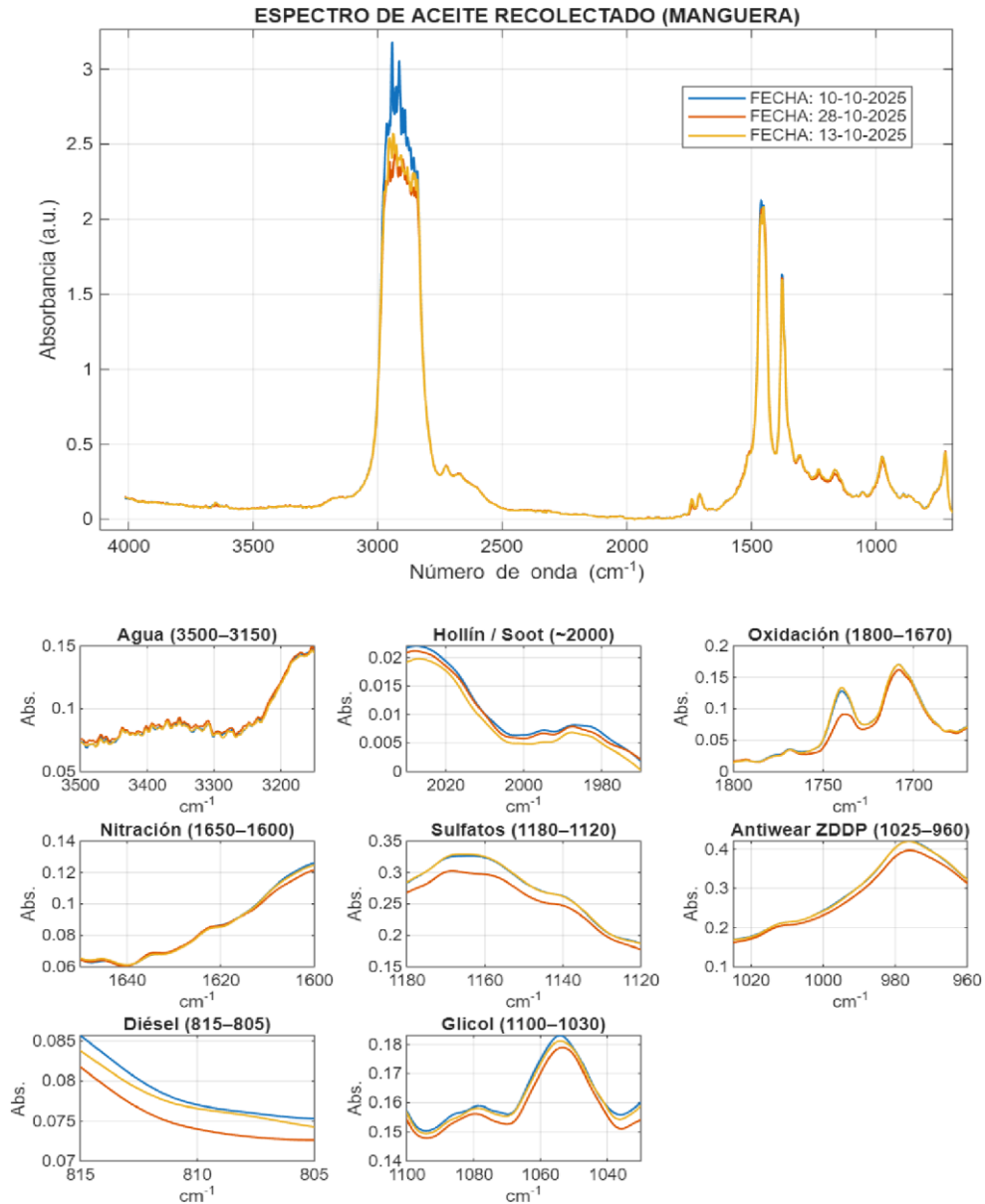
El análisis de los espectros FTIR se realizó conforme a la norma ASTM E2412, la cual establece la evaluación del estado del aceite lubricante mediante el análisis comparativo y tendencial de regiones espectrales específicas del infrarrojo medio. En la Figura 9 se presentan los espectros FTIR correspondientes a muestras de aceite lubricante recolectadas del sistema de almacenamiento (manguera) en diferentes fechas, utilizados para verificar la estabilidad espectral del lubricante previo a su uso operativo.

La región comprendida entre 3500 y 3150 cm^{-1} se asocia a la presencia de agua, identificada mediante la banda ancha correspondiente al estiramiento del grupo hidroxilo (O–H). La zona cercana a 2000 cm^{-1} se emplea para la evaluación de hollín, mientras que el intervalo 1800 – 1670 cm^{-1} corresponde al análisis de oxidación, relacionado con la formación de grupos carbonilo (C=O).

La nitración se evalúa en el rango 1650 – 1600 cm^{-1} , asociado a la presencia de compuestos nitrogenados, y la sulfatación en la región 1180 – 1120 cm^{-1} , vinculada a subproductos de la combustión y oxidación de aditivos. El estado del aditivo antidesgaste ZDDP se analiza en el intervalo 1025 – 960 cm^{-1} , permitiendo evaluar su presencia y comportamiento relativo. Finalmente, las regiones asociadas a dilución por diésel (815 – 805 cm^{-1}) y contaminación por glicol (1100 – 1030 cm^{-1}) se incluyen como parte del monitoreo de posibles contaminantes externos. (*Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*, 2023c).

Figura 9

Espectros FTIR del aceite lubricante recolectado del sistema de almacenamiento (manguera) en diferentes fechas, obtenidos mediante analizador ERASPEC OIL.



Nota. Espectros FTIR obtenidos con ERASPEC OIL y procesados en MATLAB. (Arias E. & Espinoza C, 2026).

En continuidad con el análisis presentado anteriormente, en la figura 10 se presentan los espectros FTIR correspondientes a muestras de aceite lubricante nuevo recolectadas del sistema de almacenamiento en barril en diferentes fechas. La

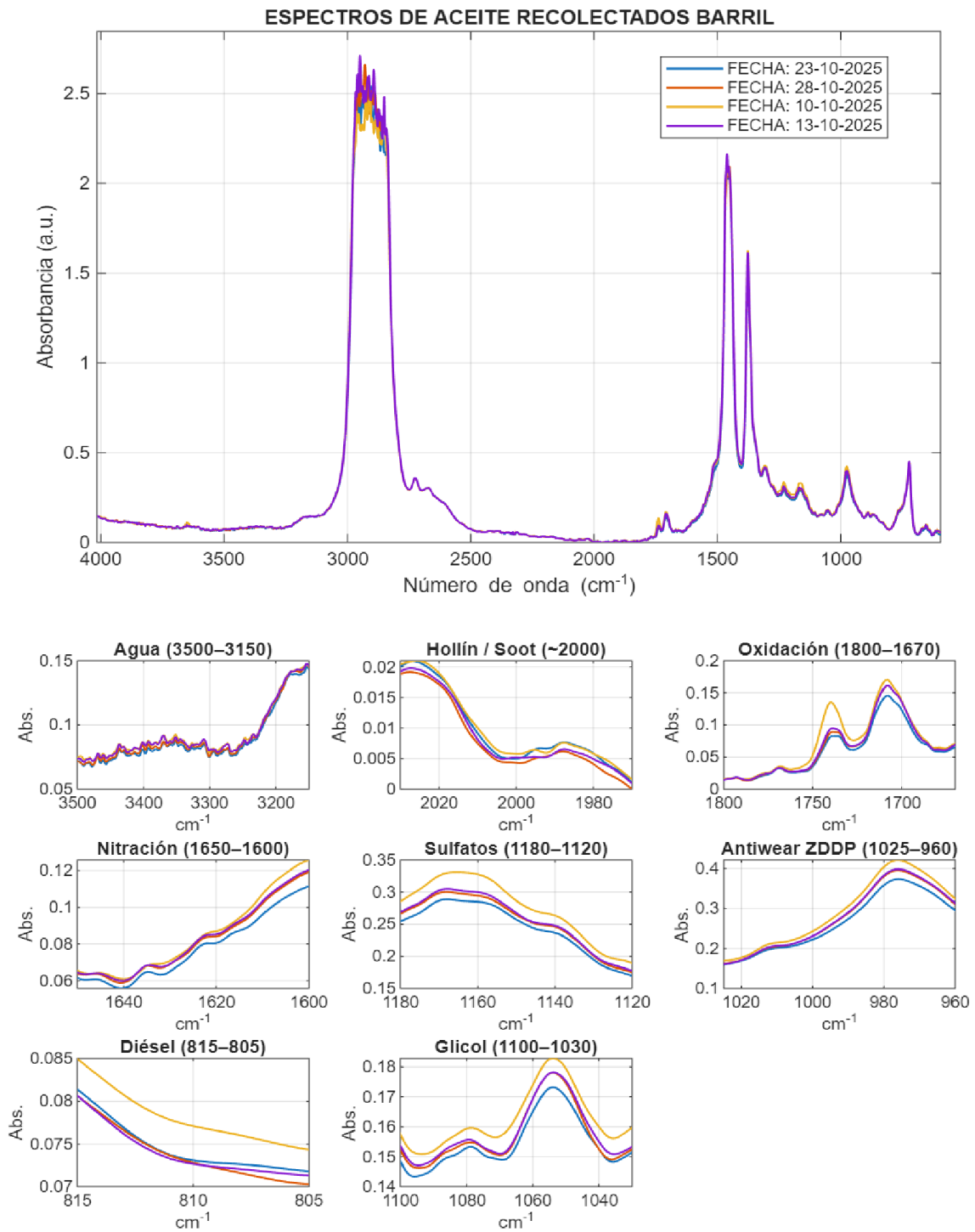
superposición de los espectros completos permite evaluar la estabilidad espectral del lubricante durante el periodo de almacenamiento, así como la repetibilidad del método de medición, conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM E2412.

El comportamiento espectral observado no evidencia la aparición de nuevas bandas ni desplazamientos significativos de la línea base, lo que indica que la composición química global del aceite lubricante se mantiene estable en el tiempo. Las variaciones de absorbancia registradas en las regiones espectrales evaluadas se mantienen dentro de márgenes consistentes con un aceite nuevo almacenado, sin indicios de procesos avanzados de degradación oxidativa, contaminación externa o agotamiento crítico del paquete de aditivos.

En este contexto, los espectros FTIR obtenidos a partir de muestras recolectadas directamente del barril constituyen una referencia interna representativa del estado inicial del lubricante, la cual es utilizada posteriormente para la comparación con muestras obtenidas del sistema de distribución y con aceites en condición de servicio.(Wolak et al., 2020a).

Figura 10

Espectros FTIR correspondientes a la recolección de aceite lubricante realizada el 13/10/2025.



Nota. Espectros FTIR obtenidos con analizador ERASPEC OIL y procesados en MATLAB. (Arias E. & Espinoza C, 2026).

5.4 Análisis espectral FTIR de las muestras de aceite lubricante

El análisis espectral mediante FTIR, realizado conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412, permitió evaluar de manera objetiva el comportamiento espectral del aceite lubricante nuevo recolectado desde el sistema de almacenamiento y la línea de suministro. La elevada similitud observada entre los espectros obtenidos, así como la ausencia de variaciones significativas en las regiones diagnósticas asociadas a procesos de degradación, contaminación y consumo de aditivos, confirman la estabilidad química del lubricante previo a su uso operativo.

En este contexto, los resultados obtenidos permiten definir un espectro FTIR representativo del aceite lubricante empleado en la flota de la EMAC EP, el cual se establece como línea base técnica para el análisis comparativo y por tendencia de las muestras de aceite en servicio. Esta referencia metodológica garantiza la consistencia y trazabilidad del análisis posterior, el cual se desarrolla en el capítulo siguiente. (Wolak et al., 2020).

6. CAPITULO 3: Comparar los resultados obtenidos en los análisis con las especificaciones del fabricante y estándares técnicos aplicables, para verificar el cumplimiento de criterios de calidad.

Con base en los resultados fisicoquímicos obtenidos en el capítulo anterior, el presente capítulo desarrolla un análisis comparativo entre los valores medidos, las especificaciones técnicas del fabricante y los criterios establecidos en normas internacionales aplicables. Este análisis permite evaluar el cumplimiento de los

parámetros de calidad del lubricante y determinar su condición técnica previa al establecimiento de la línea base propuesta.

6.1 Comparación de resultados con especificaciones del fabricante y estándares técnicos

La EMAC EP emplea aceite lubricante Valvoline Premium Blue™ 7800 Plus SAE 15W-40 (API CI-4 PLUS/SL), destinado a la operación diésel en condiciones de servicio severo. Para verificar el cumplimiento de criterios de calidad, los resultados obtenidos en laboratorio se contrastaron con:

- **SAE J300:** clasificación de viscosidad por grado (criterio normativo para confirmar el grado SAE a 100 °C).
- **Ficha técnica del fabricante:** del producto Valvoline Premium Blue 7800 Plus 15W-40: valores típicos de referencia (viscosidad y TBN, entre otros).
- **Métodos ASTM aplicados:** D445 (viscosidad), D664 (TAN), D2896 (TBN) y E2412 (indicadores por FTIR) para asegurar trazabilidad del resultado al método.

Nota técnica clave:

Las muestras “Tanque/Barril/Manguera (almacenamiento)” representan aceite previo al uso operativo (las más importantes para la aceptación). En cambio, las muestras “Vehículo (motor)” reflejan aceite en condición de servicio (con degradación esperable), por lo que su comparación se interpreta como un diagnóstico de condición, no como “aceite nuevo”.(ASTM International, 2023).

Tabla 4.

Especificaciones técnicas del fabricante Valvoline Premium Blue 7800 Plus SAE 15W-40.

Propiedad	Valor del fabricante	Norma
Viscosidad @100°C	15.3 cSt	ASTM D445
Viscosidad @40°C	113.6 cSt	ASTM D445
Índice de viscosidad	141	ASTM D2270
Densidad 15°C	0.85 g/cm ³	ASTM D4052
TBN	12 mg KOH/g	ASTM D2896
Cenizas sulfatadas	<1.6%	ASTM D874
Noack (% pérdidas)	10.7%	ASTM D5800
Zinc (ZDDP)	1250 ppm	-
Fósforo	1140 ppm	-

Nota. (American Petroleum Institute, 2019).

6.2 Evaluación por tendencia FTIR del aceite lubricante: referencia vs muestras en servicio

El análisis comparativo por tendencia FTIR se realiza tomando como referencia el espectro base del aceite lubricante nuevo, definido en el Capítulo 2 (Figuras 9 y 10), correspondiente a muestras recolectadas del sistema de almacenamiento y de la línea de suministro. Dichos espectros constituyen la línea base espectral utilizada para evaluar el comportamiento del lubricante en condiciones de servicio.

A partir de esta referencia, los espectros FTIR de las muestras de aceite en servicio recolectadas de la flota vehicular de la EMAC EP se comparan con el objetivo de identificar variaciones relativas en las regiones espectrales asociadas a procesos de degradación, contaminación y consumo de aditivos, conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412. Este enfoque permite evaluar el estado del lubricante mediante análisis comparativos y tendenciales, evitando la duplicación de resultados y asegurando la coherencia metodológica entre los capítulos.

6.3 Comparación global de los indicadores FTIR en muestras de aceite en servicio

6.3.1 Espectro aceite base vs camión AMA1499

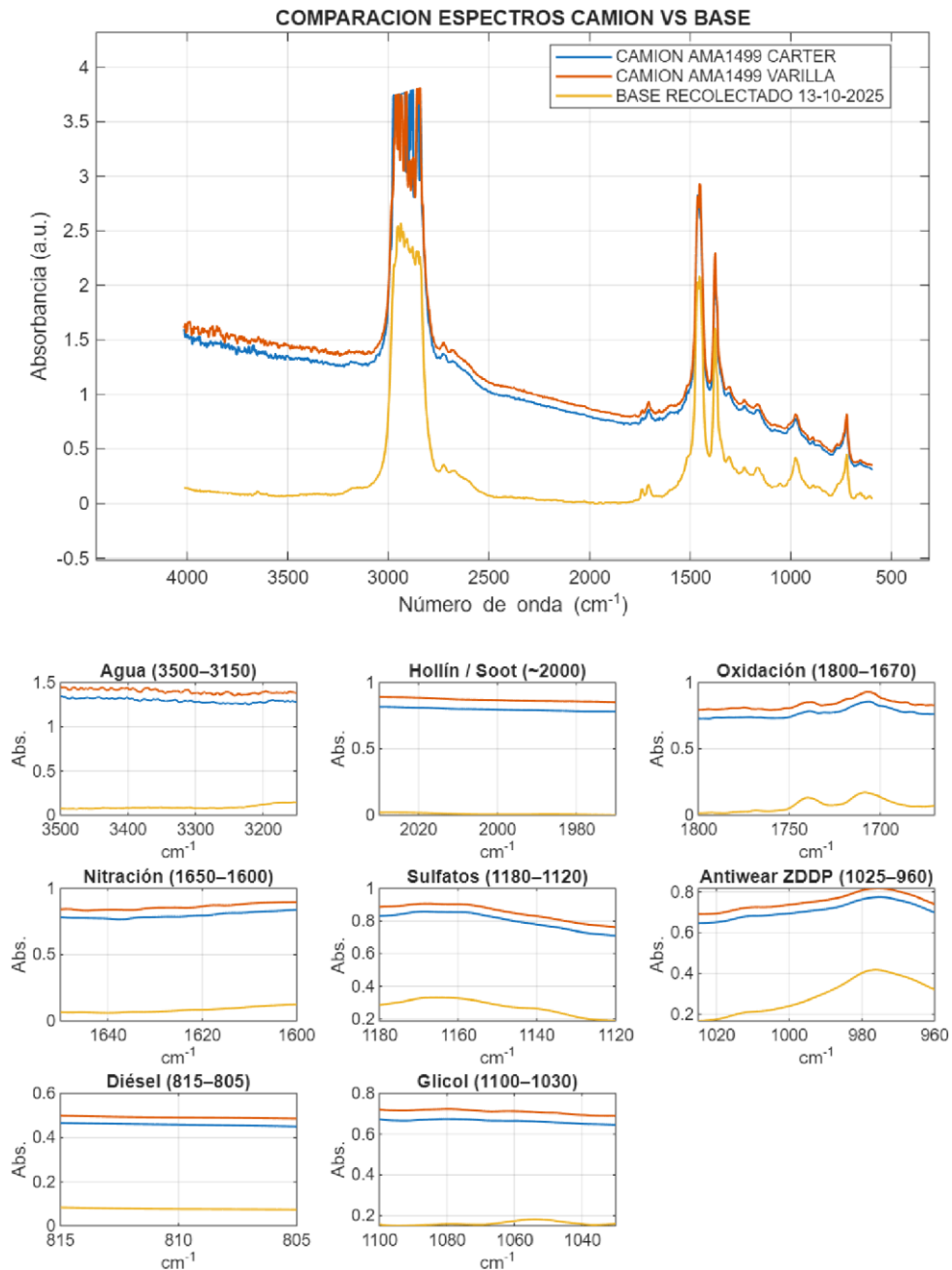
En la Figura 12 se presenta la comparación de los espectros FTIR de las muestras de aceite en servicio de la flota vehicular de la EMAC EP con la línea base espectral definida en el Capítulo 2. Esta representación gráfica permite visualizar de manera integrada el comportamiento del lubricante en las principales regiones espectrales

asociadas a procesos de degradación, contaminación y consumo de aditivos, conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412.

El análisis conjunto de los espectros permite identificar tendencias generales comunes entre las muestras evaluadas, lo que facilita una interpretación global del estado del lubricante sin recurrir a descripciones individuales de cada región espectral. Este enfoque comparativo contribuye a fortalecer la evaluación técnica del comportamiento del lubricante en condiciones reales de operación.

Figura 11

Espectros FTIR correspondientes al aceite lubricante nuevo utilizado como referencia (aceite base recolectado el 13/10/2025) y a muestras de aceite en servicio obtenidas de un camión.



Nota. Comparación metodológica de espectros FTIR entre el aceite base (13/10/2025) y el aceite en servicio del camión AMA1499, obtenidos con el analizador ERASPEC OIL y procesados en MATLAB.

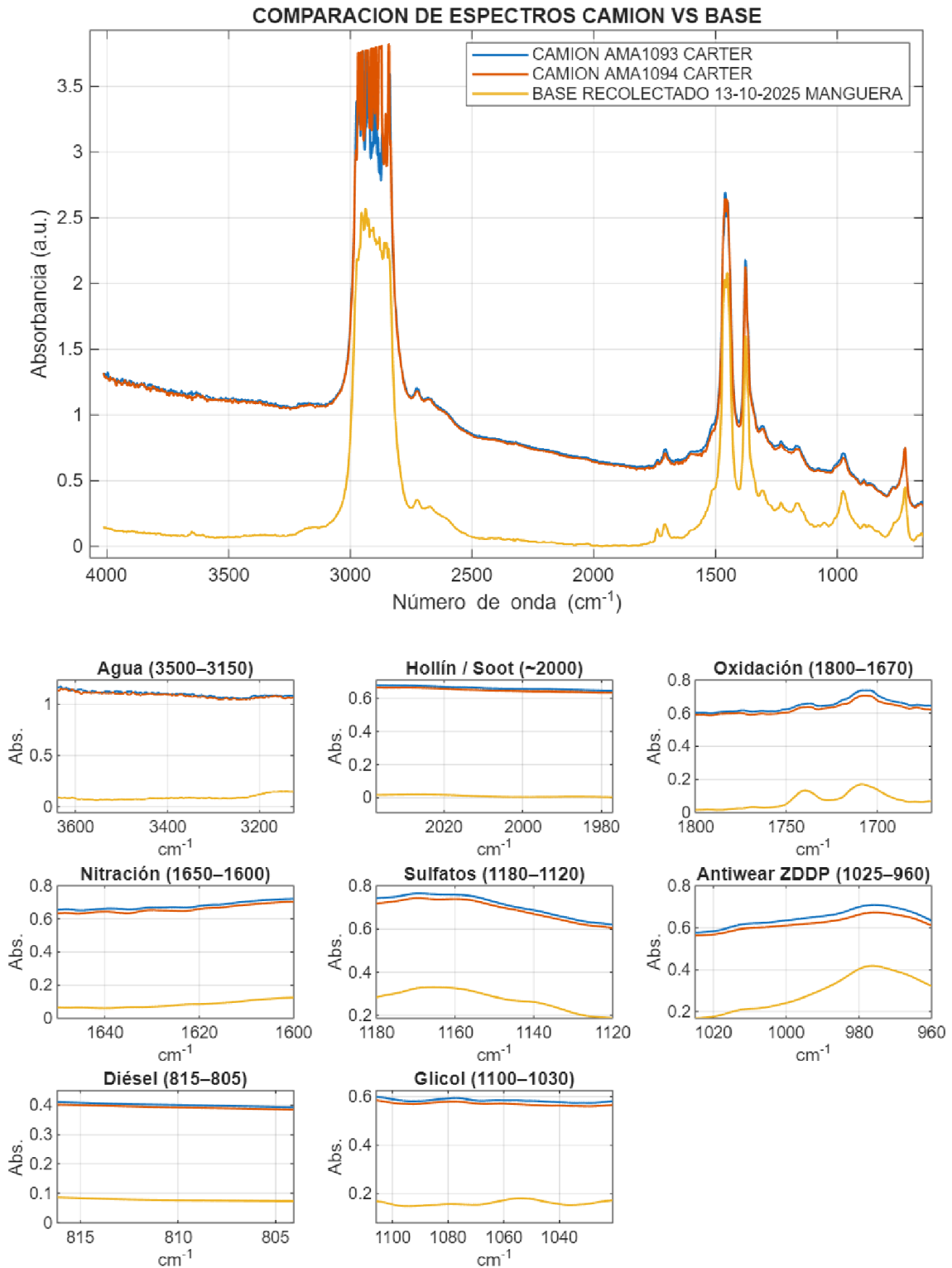
6.3 Espectro aceite base vs camión AMA1094 & AMA1093

En la Figura 12 se presenta la comparación global de los espectros FTIR correspondientes a las muestras de aceite en servicio recolectadas de los camiones AMA1093 y AMA1094, respecto a la línea base espectral definida en el Capítulo 2. Esta comparación permite evaluar de manera integrada el comportamiento del lubricante en servicio, identificando tendencias relativas en las regiones espectrales asociadas a procesos de degradación, contaminación y consumo de aditivos, conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412.

La visualización conjunta de los espectros facilita una interpretación comparativa del estado del lubricante entre diferentes unidades vehiculares, constituyendo un complemento del análisis global presentado previamente y reforzando la evaluación técnica del lubricante en condiciones reales de operación.

Figura 12

Espectros FTIR del aceite base y de muestras de aceite en servicio.



Nota. Espectros FTIR del aceite base y de aceites en servicio, analizados por tendencia conforme a la norma ASTM E2412.

6.3.2 Análisis técnico comparativo de los espectros FTIR de aceite en servicio (ASTM E2412)

El análisis comparativo de los espectros FTIR de las muestras de aceite en servicio correspondientes a los camiones AMA1499, AMA1093 y AMA1094, realizado respecto a la línea base espectral definida en el Capítulo 2, permite evaluar de manera integral el comportamiento del lubricante bajo condiciones reales de operación, conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412.

En la región asociada al contenido de agua ($3500\text{--}3150\text{ cm}^{-1}$), las muestras en servicio presentan un incremento moderado de absorbancia en comparación con la línea base, atribuible a la humedad inherente al régimen normal de operación y a las condiciones ambientales del sistema. No se observan incrementos abruptos ni bandas intensificadas que indiquen contaminación severa por agua.

La región correspondiente al hollín ($\sim 2000\text{ cm}^{-1}$) no muestra elevaciones significativas de la línea base en ninguna de las muestras analizadas, lo que indica una baja presencia de partículas carbonosas en suspensión y sugiere una adecuada eficiencia del proceso de combustión y del sistema de filtración del motor.

En el intervalo de oxidación ($1800\text{--}1670\text{ cm}^{-1}$), se observa un incremento progresivo de la absorbancia respecto al aceite base, asociado a la formación de grupos carbonilo (C=O), característicos de procesos de oxidación térmica del lubricante durante el servicio. Este comportamiento es consistente con la degradación normal del aceite en motores diésel y no evidencia una oxidación severa.

De manera similar, la región de nitración ($1650\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$) presenta una tendencia creciente en las muestras en servicio respecto de la línea base, atribuible a la formación de compuestos nitrogenados derivados de los gases de combustión. La

magnitud de este incremento se mantiene dentro de los rangos esperados para aceites en operación, sin indicios de degradación acelerada.

En la región asociada a sulfatación ($1180\text{--}1120\text{ cm}^{-1}$), las muestras analizadas exponen un aumento moderado de absorbancia, relacionado con la presencia de subproductos de la combustión diésel y con el consumo progresivo de aditivos detergentes. Este comportamiento es coherente con el uso del lubricante en motores sometidos a cargas y ciclos operativos urbanos.

Respecto a los aditivos antidesgaste tipo ZDDP ($1025\text{--}960\text{ cm}^{-1}$), los espectros evidencian la presencia continua de bandas fosfatadas, lo que indica que el paquete de aditivos se mantiene funcional, aunque con una tendencia gradual al consumo durante el servicio. No se observa agotamiento crítico del aditivo en las muestras evaluadas.

Finalmente, las regiones correspondientes a la dilución por combustible diésel ($815\text{--}805\text{ cm}^{-1}$) y a la contaminación por glicol ($1100\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$) no presentan incrementos significativos de absorbancia respecto al espectro base, lo que permite descartar la presencia de contaminación externa relevante en las muestras analizadas.

En conjunto, el análisis global de los indicadores FTIR confirma que las variaciones espectrales observadas responden principalmente a procesos normales de degradación del lubricante durante su operación, conforme a los criterios de evaluación por tendencia establecidos en la norma ASTM E2412, lo que permite una caracterización técnica confiable del estado del aceite en servicio.

6.4 Comparación de viscosidad SAE J300 y fabricante

6.4.1 Interpretación técnica de los parámetros reológicos y fisicoquímicos del lubricante

La Tabla 5 presenta el resumen integrado de los principales parámetros fisicoquímicos del aceite lubricante analizado, incluyendo la viscosidad cinemática a 40 °C y 100 °C, el Número Ácido Total (TAN) y el Número Base Total (TBN), diferenciados según el origen de las muestras (aceite en vehículo y aceite en almacenamiento). Los ensayos se realizaron conforme a los métodos normalizados ASTM D445 para la determinación de la viscosidad cinemática, ASTM D664 para el TAN y ASTM D2896 para el TBN.

La viscosidad constituye el parámetro reológico más relevante del lubricante, ya que condiciona la formación de la película lubricante, la protección frente al desgaste y la estabilidad del aceite bajo condiciones variables de temperatura y carga. En aceites multigrado, la verificación del grado SAE se realiza mediante el análisis de la viscosidad cinemática a 100 °C, conforme a los rangos establecidos en la norma SAE J300. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 5, las muestras correspondientes al aceite en almacenamiento presentan valores de viscosidad a 100 °C comprendidos dentro del rango definido para el grado SAE 40 (12.5–16.3 cSt), lo que confirma que el lubricante mantiene su clasificación SAE 15W-40 previo a su utilización, sin evidencia de alteraciones reológicas significativas (Chevron Marine Products LLC, 2020).

En el caso de las muestras de aceite de vehículo, si bien los valores de viscosidad a 100 °C siguen dentro del rango SAE 40, se observa una mayor dispersión que en las muestras en almacenamiento. Este comportamiento es consistente con efectos propios del servicio, tales como dilución por combustible, cizallamiento mecánico o variaciones

asociadas a la condición operativa del motor, y no debe interpretarse como un criterio de aceptación aplicable a aceite nuevo.

Al comparar los resultados obtenidos con los valores típicos reportados en la ficha técnica del fabricante, se evidencia que las viscosidades promedio a 40 °C y 100 °C de las muestras en almacenamiento son inferiores a los valores de referencia indicados en el PDS (Visc@40 = 113.6 cSt; Visc@100 = 15.3 cSt) (Valvoline, 2021) Estas diferencias pueden atribuirse a variaciones normales entre lotes de producción, a condiciones instrumentales de medición, a la calibración del equipo, a desviaciones en la temperatura efectiva del ensayo o a la posible existencia de variantes comerciales del producto con valores típicos distintos. Desde el punto de vista técnico, se recomienda, en caso de requerirse trazabilidad certificada, solicitar el certificado de análisis del lote o repetir el ensayo conforme a ASTM D445 en un laboratorio externo acreditado.

En relación con los parámetros químicos, el Número Ácido Total (TAN) es un indicador del contenido de compuestos ácidos presentes en el aceite, los cuales se generan principalmente por procesos de oxidación y degradación térmica. Por su parte, el Número Base Total (TBN) representa la reserva alcalina disponible para neutralizar dichos ácidos y constituye un parámetro crítico en motores diésel. Según los resultados de la Tabla 5, las muestras en almacenamiento presentan valores bajos y estables de TAN, junto con niveles adecuados de TBN, lo cual es característico de un aceite sin uso. En contraste, las muestras en vehículo muestran una mayor variabilidad del TAN y una reducción del TBN, comportamiento esperable como consecuencia del consumo progresivo de los aditivos alcalinos durante la operación del motor, conforme a los criterios establecidos por los métodos normalizados (ASTM International, 2023).

Tabla 5.

Parámetros fisicoquímicos del aceite lubricante

Origen	N° de muestras	Viscosidad 40 °C (cSt)	Viscosidad 100 °C (cSt)	TAN	TBN
Vehículo	8	89.86 (64.18– 104.40)	15.09 (13.79– 16.15)	1.38 (0.75– 2.65)	14.08 (9.34-31.12)
Almacenamiento	7	88.31 (87.36– 90.72)	14.03 (13.63– 14.25)	0.28 (0.12– 0.36)	10.56 (9.69– 10.93)

Nota. Los valores se presentan como promedio (mín–máx). La viscosidad se expresa en centistokes (cSt) a 40 °C y 100 °C.

6.4.2 Evaluación integrada de indicadores FTIR del aceite lubricante

La Tabla 6 presenta la comparación integrada de los principales indicadores de degradación del aceite lubricante y de la tendencia relativa de los aditivos, obtenidos mediante espectroscopía FTIR, conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412. Los resultados se muestran como valores promedio y se diferencian según el origen de las muestras (aceite en almacenamiento y aceite en vehículo), lo que permite una evaluación comparativa del estado del lubricante tanto en condición previa al uso como en servicio.

6.4.3 Relación entre degradación química y condición del aceite

En concordancia con los resultados fisicoquímicos presentados en la Tabla 6, en particular con los bajos valores de TAN observados en el aceite en almacenamiento, los indicadores FTIR asociados a procesos de degradación oxidativa y nitrativa muestran niveles reducidos. Los valores promedio de oxidación y nitración en las

muestras en almacenamiento se mantienen bajos, lo que confirma la ausencia de procesos significativos de degradación química durante el período de almacenamiento y es consistente con un lubricante sin exposición a condiciones térmicas severas o a subproductos de combustión.

Adicionalmente, la ausencia de hollín en las muestras en almacenamiento refuerza la interpretación de que el aceite no ha estado expuesto a procesos de combustión, lo que valida su condición de aceite sin uso. De manera complementaria, los niveles de subproductos sulfatados se mantienen en rangos moderados, coherentes con un aceite estable y sin evidencia de degradación avanzada, conforme a los criterios de interpretación establecidos para FTIR (Nadkarni, 2007).

6.4.4 Indicadores FTIR en aceite en servicio

En el caso de las muestras de aceite de vehículo, la Tabla 6 evidencia un incremento relativo de los indicadores de nitración y de la presencia de hollín, lo cual es coherente con la operación normal de un motor diésel, donde la entrada de subproductos de combustión y la mayor carga térmica favorecen estos procesos. Estos resultados deben interpretarse como indicadores de condición de servicio y no como criterios de rechazo del lubricante en estado nuevo, ya que reflejan la evolución normal del aceite durante su operación.

En cuanto a la tendencia de aditivos evaluada mediante FTIR, los indicadores asociados a ZDDP y a antioxidantes fenólicos y amínicos muestran valores relativamente mayores en las muestras almacenadas en comparación con las muestras en vehículo. Esta diferencia es consistente con la ausencia de consumo de aditivos en el aceite sin uso y con la depleción progresiva del paquete de aditivos durante el servicio, fenómeno esperado en lubricantes sometidos a condiciones reales de operación. Esta tendencia

resulta coherente con la reducción del TBN observada en las muestras en vehículo, evidenciando la relación directa entre el consumo de aditivos alcalinos y la neutralización de compuestos ácidos generados durante la combustión (Valvoline, 2021).

Tabla 6.

Comparación de propiedades promedio del aceite lubricante en motor y en almacenamiento mediante análisis FTIR.

Origen	Oxidación (prom.)	Nitración (prom.)	Sulfatación Subprod. (prom.)	Hollín (prom.)	Aditivos FTIR (prom.)
Vehículo (8 muestras)	8.99	6.93	19.41	1.89	ZDDP: 0.38 / Fenol AO: 0.13 / Amine AO: 0.39
Almacenamiento (7 muestras)	7.82	3.61	14.15	0.00	ZDDP: 0.47 / Fenol AO: 0.17 / Amine AO: 0.54

Nota: El análisis FTIR permitió determinar los niveles promedio de degradación y de aditivos del aceite lubricante. Las muestras de vehículo corresponden a aceite en servicio, mientras que las de almacenamiento corresponden a aceite nuevo. Los valores de los aditivos se expresan en unidades relativas conforme a la norma ASTM E2412.

7. Capítulo 4: Establecer rangos de referencia internos que definan una línea base técnica para la aceptación, reprocesamiento o descarte de aceites de motor almacenados, ajustados a las condiciones locales de almacenamiento y uso

En este capítulo se establecen los rangos de referencia internos que constituyen la línea base técnica del lubricante utilizado por la EMAC EP, a partir del análisis comparativo desarrollado en el Capítulo 3. Estos rangos permiten establecer criterios objetivos para la aceptación, el reprocesamiento o el descarte de aceites de motor

almacenados, considerando las condiciones reales de almacenamiento, la operación urbana y la carga térmica propias de la flota institucional.

Los valores propuestos se fundamentan en normas técnicas internacionales (ASTM, SAE, API), en las especificaciones del fabricante y en la evidencia experimental obtenida mediante análisis fisicoquímicos y espectrales, priorizando un enfoque de mantenimiento predictivo y una toma de decisiones basada en la condición.

7.1 Rangos de referencia internos para indicadores FTIR del aceite lubricante

En la Tabla 7 se presentan los rangos de referencia internos propuestos para los principales indicadores de degradación y contaminación del aceite lubricante obtenidos mediante espectroscopía FTIR, conforme a la norma ASTM E2412. Estos rangos fueron definidos a partir de los valores promedio del aceite en almacenamiento, considerados como condición base, y de incrementos relativos que permiten identificar desviaciones significativas del comportamiento esperado.

Tabla 7.

Rangos de referencia internos propuestos para indicadores FTIR del aceite lubricante

Parámetro	Condición	Condición de	Condición
FTIR	aceptable	alerta	crítica
Oxidación	≤ 8.6	$> 8.6 - 9.8$	> 9.8
Nitración	≤ 4.0	$> 4.0 - 4.5$	> 4.5
Sulfatación	≤ 15.6	$> 15.6 - 17.7$	> 17.7
Hollín	$0.0 - 0.5$	$> 0.5 - 1.5$	> 1.5

Nota. Rangos internos de referencia definidos a partir del aceite base, conforme a la norma ASTM E2412.

7.2 Definición de la línea base del lubricante

La Tabla 8 presenta los rangos internos propuestos para los principales indicadores fisicoquímicos y espectroscópicos del aceite lubricante. Dichos rangos fueron definidos a partir de los valores promedio del aceite en almacenamiento, considerados como condición base, y de variaciones relativas controladas que permiten identificar desviaciones significativas respecto al comportamiento esperado del lubricante. Este enfoque facilita el seguimiento sistemático de la degradación y la contaminación del aceite mediante espectroscopía FTIR, en concordancia con la metodología establecida en la norma ASTM E2412.

Tabla 8.

Criterios internos de aceptación del aceite lubricante según parámetros fisicoquímicos y tendencia de aditivos FTIR

Parámetro	Condición aceptable	Condición de alerta	Condición crítica
Visc@100 (SAE 40)	12.5 – 16.3	—	<12.5 o >16.3
TAN	≤ 0.36	0.37 – 0.60	> 0.60
TBN	≥ 9.69	9.00 – 9.68	< 9.00
ZDDP (FTIR)	≥ 0.42	0.35 – 0.41	< 0.35
Antioxidantes fenólicos (FTIR)	≥ 0.15	0.11 – 0.14	< 0.11
Antioxidantes amínicos (FTIR)	≥ 0.49	0.41 – 0.48	< 0.41

Nota. Los rangos de los parámetros fisicoquímicos (Visc@100, TAN y TBN) reflejan criterios internos de aceptación del aceite lubricante almacenado. Los valores de aditivos (ZDDP y antioxidantes) corresponden a absorbancia relativa determinada por FTIR y se interpretan mediante análisis comparativo y de tendencias.

Adicionalmente, la evaluación de la tendencia del paquete de aditivos se realiza a partir de indicadores FTIR asociados al aditivo antidesgaste ZDDP y a los antioxidantes fenólicos y amínicos. El análisis comparativo de estas señales espectrales permite identificar el agotamiento relativo de los aditivos durante el almacenamiento, así como evaluar la estabilidad química del lubricante, aspectos clave para garantizar la protección antidesgaste y antioxidante del aceite.

Los parámetros fisicoquímicos tradicionales, tales como la viscosidad cinemática a 100 °C (Visc@100), el Número de Acidez Total (TAN) y el Número Base Total (TBN), se integran como elementos fundamentales para la validación de la línea base del lubricante. La incorporación conjunta de estos parámetros con los indicadores FTIR, tal como se resume en la Tabla 8, permite establecer un enfoque técnico integral, lo que fortalece la confiabilidad del diagnóstico y la toma de decisiones dentro del programa de mantenimiento de la EMAC EP.

7.3 Validación experimental de la línea base mediante contaminación controlada

7.3.1 Metodología de contaminación controlada

Para la validación experimental de la línea base del lubricante, se prepararon mezclas controladas de aceite nuevo completamente sellado con diferentes contaminantes, específicamente: agua, diésel y refrigerante. Las mezclas se prepararon con una masa total constante de 50 g, variando únicamente la proporción del contaminante, con el fin de evaluar la sensibilidad del análisis FTIR ante concentraciones crecientes.

Las concentraciones seleccionadas se definieron considerando rangos representativos de la contaminación real en motores diésel, lo que permite simular

condiciones desde trazas iniciales hasta niveles fácilmente detectables mediante espectroscopía infrarroja. La preparación de las mezclas se realizó por peso, lo que garantizó una mayor precisión experimental y redujo errores asociados a variaciones volumétricas.

Una vez preparadas, las muestras fueron homogeneizadas cuidadosa y posteriormente analizadas mediante espectroscopía FTIR con el equipo ERASPEC OIL, obteniéndose espectros en el rango del infrarrojo medio, entre 4000 y 550 cm^{-1} , conforme a la norma ASTM E2412.

Se prepararon mezclas de aceite lubricante con agua, diésel y refrigerante en concentraciones crecientes, manteniendo un total de 50 g por muestra. Como se puede observar en la tabla 9 las mezclas, se varió únicamente el porcentaje, ajustando el peso de aceite en consecuencia, para simular condiciones desde trazas mínimas hasta niveles detectables. Esta preparación permite evaluar cuantitativamente y de manera reproducible cómo cada contaminante afecta el aceite, garantizando la homogeneidad antes del análisis FTIR. (ASTM E2412, 2018).

Tabla 9.

Preparación de mezclas de aceite lubricante con agua, diésel y refrigerante (50 g totales)

Contaminante	Concentración (%)	Aceite (g)	Contaminante (g)
Agua	0,05	49,975	0,025
Agua	0,10	49,95	0,05
Agua	0,20	49,9	0,1
Agua	0,30	49,85	0,15
Agua	0,40	49,8	0,2
Agua	0,50	49,75	0,25
Diésel	0	50	0
Diésel	2	49	1
Diésel	4	48	2
Diésel	6	47	3
Diésel	8	46	4
Refrigerante	0,05	49,975	0,025
Refrigerante	0,10	49,95	0,05
Refrigerante	0,20	49,9	0,1
Refrigerante	0,30	49,85	0,15
Refrigerante	0,40	49,8	0,2
Refrigerante	0,50	49,75	0,25

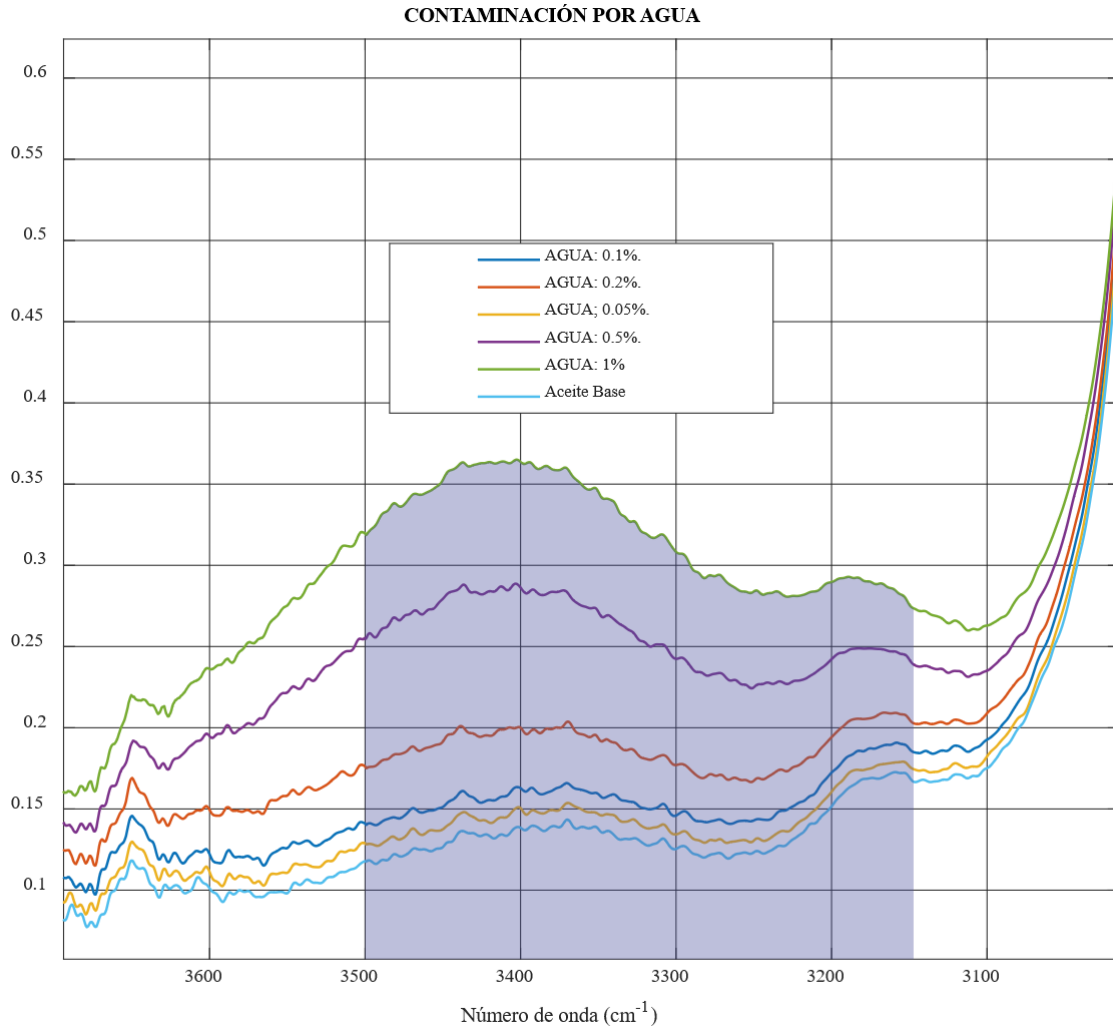
Nota. Todas las mezclas fueron preparadas por masa total de 50 g utilizando balanza analítica, homogenizadas mediante agitación controlada y analizadas inmediatamente mediante FTIR, según ASTM E2412, asegurando distribución uniforme de los contaminantes.

A partir de la metodología descrita y de las mezclas preparadas según la Tabla 9, se obtuvieron espectros FTIR del aceite base con diferentes contaminantes, con el fin de validar experimentalmente la respuesta del análisis FTIR frente a la contaminación controlada del lubricante. La Figura 14 presenta los espectros con adición progresiva de agua, lo que permite evaluar la sensibilidad del método en la banda asociada al estiramiento O–H. La Figura 15 muestra los espectros correspondientes a mezclas con combustible diésel, evidenciando la respuesta espectral asociada a la dilución por combustible, mientras que la Figura 16 corresponde a mezclas con refrigerante, donde se observa el incremento de absorbancia en la región característica de enlaces C–O.

En conjunto, estas figuras permiten analizar de forma comparativa la respuesta espectral del aceite base frente a los principales contaminantes evaluados, proporcionando el soporte experimental para la validación de la línea base del lubricante conforme a la norma ASTM E2412.

Figura 13

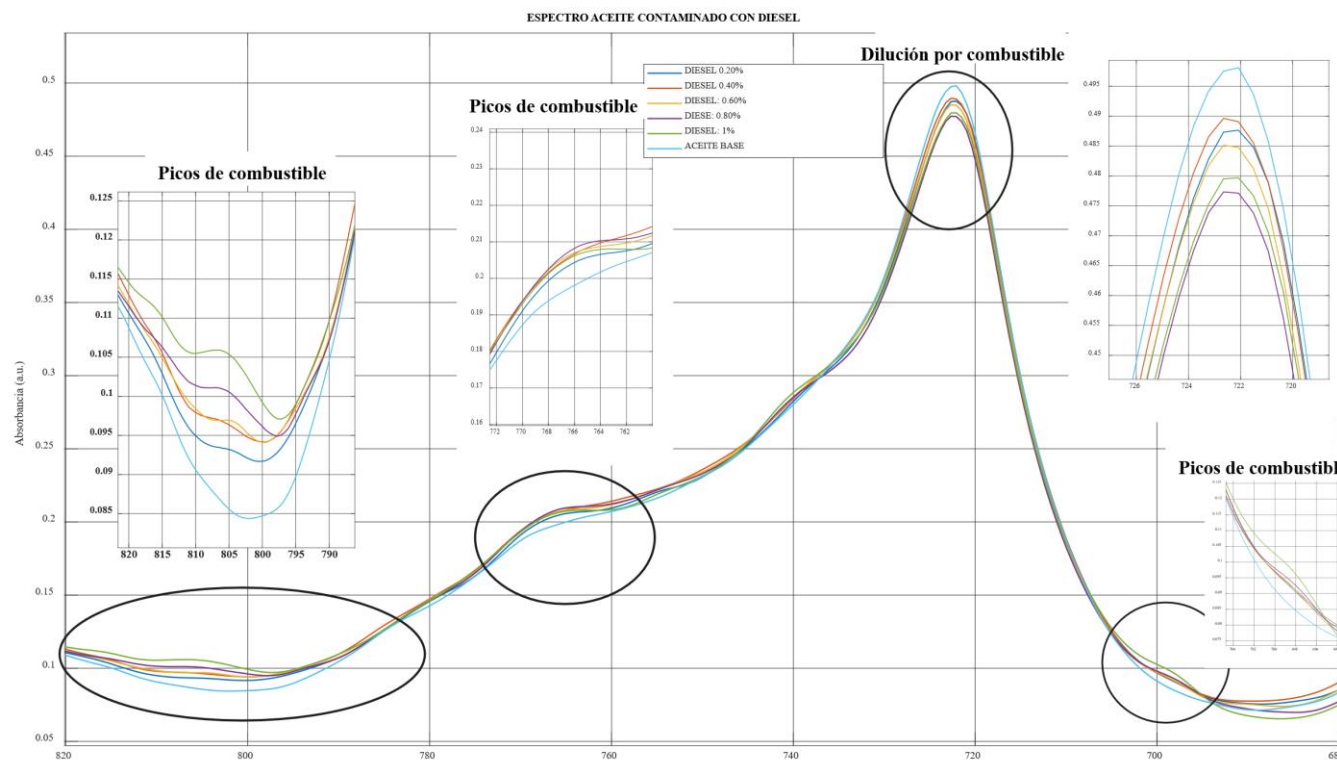
Comparación de los espectros FTIR del aceite base sin contaminación y de muestras con adición progresiva de agua.



Nota. Espectros FTIR obtenidos a partir de mezclas controladas de aceite base con adición progresiva de agua, preparados conforme a la Tabla 9 y analizados según ASTM E2412.

Figura 14

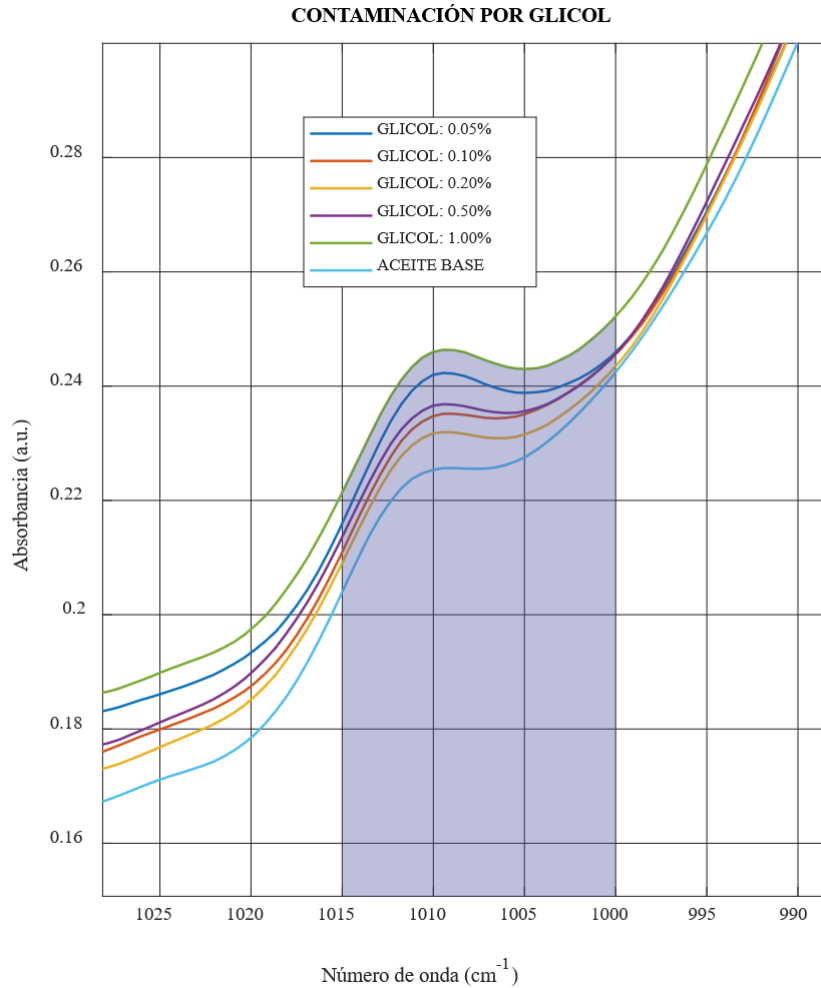
Comparación de los espectros FTIR del aceite base sin contaminar y de muestras con adición progresiva de combustible diésel.



Nota. Espectros FTIR correspondientes a mezclas de aceite base con diferentes porcentajes de combustible diésel, preparados conforme a la Tabla 9 y evaluados según ASTM E2412.

Figura 15

Comparación de los espectros FTIR del aceite base sin contaminar y de muestras con adición progresiva de glicol.



Nota. Espectros FTIR de mezclas de aceite base con adición progresiva de refrigerante (glicol), preparadas conforme a la Tabla 9 y analizadas según ASTM E2412.

7.4 Análisis ante contaminación controlada del lubricante

El análisis conjunto de los espectros FTIR obtenidos a partir de mezclas controladas de aceite lubricante con adición progresiva de agua, combustible diésel y glicol permitió evaluar de manera integral la sensibilidad y confiabilidad de la técnica

FTIR para la detección de los principales contaminantes del lubricante, conforme a los criterios establecidos en la norma ASTM E2412. La evaluación se realizó mediante un enfoque comparativo y por tendencia, considerando la evolución de la absorbancia en regiones espectrales diagnósticas específicas del infrarrojo medio.

Los resultados evidencian que, para los tres tipos de contaminantes analizados, la respuesta espectral del aceite presenta un comportamiento sistemático y progresivo en función del incremento de la concentración del contaminante, manteniéndose una relación directa entre la magnitud de la absorbancia y el nivel de contaminación introducido. Este comportamiento confirma que el análisis FTIR permite identificar no solo la presencia del contaminante, sino también su evolución relativa dentro del lubricante, aspecto fundamental para el monitoreo de condición.

En el caso de la contaminación por agua, el incremento gradual de la banda ancha asociada al estiramiento del grupo hidroxilo (O–H) en la región $3500\text{--}3150\text{ cm}^{-1}$ demuestra la alta sensibilidad del método para detectar incluso concentraciones bajas de humedad, mientras que para concentraciones superiores se observa una intensificación claramente definida de dicha banda. De manera análoga, la contaminación por combustible diésel se manifiesta mediante el aumento progresivo de la absorbancia en la región $815\text{--}805\text{ cm}^{-1}$, asociada a vibraciones C–H características del combustible, evidenciando la capacidad del FTIR para identificar dilución del lubricante por diésel dentro de los límites de detección establecidos por la norma. Asimismo, la presencia de glicol se refleja en un incremento sistemático de la absorbancia en la región $1100\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$, correspondiente a enlaces C–O y C–O–C, confirmando la eficacia del método para la detección de contaminación por refrigerante.

La coherencia observada entre la concentración de cada contaminante y la respuesta espectral en sus respectivas regiones diagnósticas valida experimentalmente la metodología FTIR empleada en el presente estudio y respalda los criterios de identificación utilizados para el análisis de muestras reales de aceite nuevo y de aceite en servicio. En conjunto, estos resultados consolidan la línea base espectral previamente definida y proporcionan el sustento técnico necesario para la interpretación confiable de los procesos de degradación y contaminación del lubricante en condiciones reales de operación, de acuerdo con la norma ASTM E2412.

8. Conclusiones

El análisis fisicoquímico y espectral del aceite lubricante SAE 15W-40 utilizado en la flota vehicular de la EMAC EP permitió caracterizar objetivamente su condición real tanto en almacenamiento como en servicio. Los resultados obtenidos mediante espectroscopía FTIR, viscosidad cinemática, TAN, TBN, contenido de agua y conteo de partículas evidencian que el lubricante almacenado presenta una alta estabilidad química y estructural, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura especializada, donde se señala que un almacenamiento adecuado minimiza los procesos de oxidación y degradación prematura del aceite base y del paquete de aditivos.

La evaluación del comportamiento del aceite en condición de servicio mostró incrementos moderados en los indicadores de oxidación, nitración y consumo de aditivos, asociados a las condiciones severas de operación urbana de la flota analizada. Estos resultados son consistentes con estudios previos que destacan la influencia del régimen de operación, los ciclos de arranque-parada y las cargas térmicas sobre los mecanismos de degradación del lubricante, confirmando que dichos procesos pueden identificarse de forma temprana mediante técnicas FTIR y análisis fisicoquímicos complementarios.

A partir de la información experimental obtenida, fue posible establecer rangos internos de referencia para los principales indicadores de degradación y contaminación del aceite, definiendo una línea base técnica ajustada a las condiciones locales de operación y almacenamiento. Este enfoque coincide con lo propuesto por diversos autores, quienes enfatizan que las líneas base deben construirse a partir de datos reales del sistema analizado y no únicamente de límites genéricos normativos, con el fin de mejorar la sensibilidad del diagnóstico tribológico.

Finalmente, la validación experimental de la línea base mediante la contaminación controlada del aceite con agua, combustible diésel y glicol demostró la capacidad del sistema de análisis para detectar desviaciones significativas respecto del comportamiento esperado del lubricante. En conjunto, los resultados confirman que la implementación de una línea base específica fortalece la toma de decisiones técnicas, optimiza los intervalos de mantenimiento y constituye una herramienta fundamental para la transición hacia un mantenimiento predictivo y basado en condición, tal como lo recomiendan los enfoques modernos de gestión de flotas y confiabilidad operacional.

9. Recomendaciones

Se recomienda implementar de manera progresiva un programa de mantenimiento basado en la condición (CBM) para la flota vehicular de la EMAC EP, utilizando como referencia la línea base del lubricante establecida en el presente estudio. Esta estrategia permitirá optimizar los intervalos de cambio de aceite, reducir costos operativos y mejorar la confiabilidad de los motores, en concordancia con las tendencias actuales de mantenimiento predictivo reportadas en la literatura técnica.

Es aconsejable mantener un control sistemático de las condiciones de almacenamiento del aceite lubricante, garantizando ambientes libres de humedad, contaminación particulada y exposición prolongada a la radiación solar. La literatura especializada destaca que una gestión inadecuada del almacenamiento puede alterar prematuramente la estabilidad fisicoquímica del lubricante, afectando su desempeño incluso antes de su puesta en servicio.

Se sugiere incorporar de forma rutinaria el análisis por espectroscopía FTIR como herramienta primaria de diagnóstico del estado del aceite, complementándolo con ensayos fisicoquímicos como viscosidad, TAN, TBN y conteo de partículas. Este enfoque integral incrementa la sensibilidad del diagnóstico y permite la detección temprana de procesos de degradación y de contaminación, tal como proponen los estándares internacionales de análisis de aceite usado.

Asimismo, se recomienda ampliar el estudio incorporando un mayor número de muestras y periodos de monitoreo más prolongados, lo que permitiría fortalecer el análisis de tendencias y mejorar la robustez estadística de la línea base propuesta. Esta ampliación facilitaría la identificación de patrones de degradación asociados a distintos tipos de operación y condiciones de carga.

Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones integren herramientas estadísticas multivariadas y técnicas de inteligencia artificial, orientadas al análisis automatizado de datos de aceite y a la identificación de modos de falla incipientes. La implementación de estos enfoques avanzados contribuirá a consolidar un sistema de gestión del mantenimiento más eficiente, sostenible y alineado con los principios de la ingeniería de confiabilidad y la transformación digital en la gestión de flotas vehiculares.

10. Referencias bibliográficas

- Ahmed, N. S., Nassar, A. M., Abdel-Hameed, H. S., & El-Kafrawy, A. F. (2016). Preparation, characterization, and evaluation of some ashless detergent/dispersant additives for lubricating engine oil. *Applied Petrochemical Research*, 6(1), 49–58. <https://doi.org/10.1007/s13203-015-0110-5>
- Al Sheikh Omar, A., Motamen Salehi, F., Farooq, U., Morina, A., & Neville, A. (2021). Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*, 160, 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>
- Al Sheikh Omar, A., Salehi, F. M., Farooq, U., Neville, A., & Morina, A. (2022). Effect of Zinc Dialkyl Dithiophosphate Replenishment on Tribological Performance of Heavy-Duty Diesel Engine Oil. *Tribology Letters*, 70(1), 24. <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01565-8>
- Alemu, N. A., Nallamotheu, R. B., & Lakew, G. A. (2025). Optimization, characterization, and GC-MS analysis of recycled used engine oil by solvents and adsorbent extraction. *Scientific Reports*, 15(1), 517. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84132-6>
- Alimova, Z. K., Makhamajanov, M., Akhmatjanovich, I., & Magdiev, K. I. (2021). Research Of Anti-Corrosion Properties Of Engine Oils When The Engine Is Running. *The American Journal of Agriculture and Biomedical Engineering*, 03(11), 28–33. <https://doi.org/10.37547/tajabe/Volume03Issue11-08>
- American Petroleum Institute. (n.d.). *API Oil Categories*. American Petroleum Institute. Retrieved December 2, 2025, from <https://www.api.org/products-and-services/es/eolcs-oil-categories#tab-diesel-c-categories>
- American Petroleum Institute. (2019). *API service categories for engine oils*.
- American Petroleum Institute. (2023). *API engine oil licensing and certification system (EOLCS)*.
- Antony Jose, S., Perez-Perez, E., Silva, T. D., Syme, K., Westom, Z., Willis, A., & Menezes, P. L. (2025). A Comprehensive Review of Lubricant Behavior in Internal Combustion, Hybrid, and Electric Vehicles: Thermal Demands, Electrical Constraints, and Material Effects. *Lubricants*, 14(1), 14. <https://doi.org/10.3390/lubricants14010014>
- ASTM D445 International. (2017). *Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*. <https://www.astm.org/standards/d445>
- ASTM D664 Internacional. (2018). *ASTM D664-18: Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration*. <https://doi.org/10.1520/D0664>

- ASTM D5185 International. (2018). *Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry*. <https://www.astm.org/d5185-18.html>
- ASTM D6304: *Determinación más fácil de la humedad en productos derivados del petróleo* | Metrohm. (n.d.). Retrieved December 7, 2025, from https://www.metrohm.com/es_es/discover/blog/20-21/-astm-d6304--easier-determination-of-moisture-in-petroleum-produ.html
- ASTM E2412. (2010). *Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2412-10>
- ASTM International. (2017). *Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0445-17>
- ASTM International. (2023). *Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration*.
- Barazzutti, C., Cayer-Barrioz, J., & Mazuyer, D. (2023). Thin films in hydrodynamic lubrication regime: The Osiris friction setup. *Review of Scientific Instruments*, 94(6). <https://doi.org/10.1063/5.0155813>
- Chen, Y., Li, H., Li, D., Yang, K., & Zhou, J. (2026). Diesel engine lubricating oil fault prognosis: A hybrid Bayesian LSTM and deep generative model architecture for multilayer anomaly detection. *Tribology International*, 215, 111434. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.111434>
- Dutta, M., Pathiparampil, A., Murella, J., Villacarte, D., Hamada, D., Hernandez, J., & Lopez-Linares, F. (2021). Determination of base number in lubricants and additives by ASTM D2896: Substitution of chlorinated solvents and alternate electrolyte study. *Fuel*, 297, 120701. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120701>
- Eco Coulometer con electrodo generador con diafragma* | Metrohm. (n.d.). Retrieved December 16, 2025, from https://www.metrohm.com/es_es/products/2/1028/210280010.html
- Engine Oil Viscosity Classification*. (2015). https://doi.org/10.4271/J300_201501
- eralytics ERACOUNT XS, el contador de partículas ISO 4406 más rápido* | Parkes Scientific. (n.d.). Retrieved December 7, 2025, from <https://parkesscientific.com/p/eralytics-ect10-eracount-xs-the-fastest-iso-4406-particle-counter-psc4715374>
- eralytics ERASPEC FUEL, analizador de combustible FTIR* | Parkes Scientific. (n.d.). Retrieved December 7, 2025, from <https://parkesscientific.com/p/eralytics-es10-eraspec-fuel-ftir-fuel-analyzer-psc4706353>
- eralytics ERAVISC X, medidor de viscosidad y densidad 2 en 1 con precisión de laboratorio* | Parkes Scientific. (n.d.). Retrieved December 7, 2025, from

<https://parkesscientific.com/p/eralytics-evx10-eravisc-x-2-in-1-viscosity-density-psc4714370>

- Fraenza, C. C., Förster, E., Guthausen, G., Nirschl, H., & Anoardo, E. (2021). Use of ¹H-NMR spectroscopy, diffusometry and relaxometry for the characterization of thermally-induced degradation of motor oils. *Tribology International*, *153*, 106620. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106620>
- Han, J. (2024). Additives for Lubricating Oil and Grease: Mechanism, Properties and Applications. *Lubricants*, *12*(7), 243. <https://doi.org/10.3390/lubricants12070243>
- Kakuk, M., Farkas, D., Kállai-Szabó, B., Pencz, K., Mészáros, L. A., Tonka-Nagy, P. G., Kállai-Szabó, N., & Antal, I. (2025). Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES): Exploring Versatile Applications in Industrial and Analytical Fields. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, *69*(2), 339–360. <https://doi.org/10.3311/PPch.40025>
- Manuel, V., & Segarra, E. (2012). *Estudio de la degradación de los lubricantes utilizados en motor y transmisión de los vehículos recolectores a diésel de la EMAC EP*.
- Nadkarni, R. A. . (2007). *Guide to ASTM test methods for the analysis of petroleum products and lubricants*. ASTM International.
- Nagarajan, T., Khalid, M., Sridewi, N., Jagadish, P., Shahabuddin, S., Muthoosamy, K., & Walvekar, R. (2022). Tribological, oxidation and thermal conductivity studies of microwave synthesised molybdenum disulfide (MoS₂) nanoparticles as nano-additives in diesel based engine oil. *Scientific Reports*, *12*(1), 14108. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16026-4>
- Niculescu, R., Nastase, M., Negrea, D., Zaharia, C., & Clenci, A. (2024). Analysis of metal content in the lubricating oils used in truck diesel engines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1303*(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1303/1/012021>
- Pashukevich, S. V. (2022). Classification of contaminants in diesel engine oils. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, *19*(1), 84–100. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-84-84-100>
- Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. (2010a). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2412-10>
- Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. (2010b). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2412-10>
- Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. (2023a). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2412-23>

- Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. (2023b). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2412-23>
- Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. (2023c). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E2412-23>
- Ramirez Camba, R., Garcia Garcia, C., Garcia Tobar, M., & Fajardo Merchan, J. (2025a). An Integrated Methodological Approach for Interpreting Used Oil Analysis in Diesel Engines. *Lubricants*, 13(4), 169. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040169>
- Ramirez Camba, R., Garcia Garcia, C., Garcia Tobar, M., & Fajardo Merchan, J. (2025b). An Integrated Methodological Approach for Interpreting Used Oil Analysis in Diesel Engines. *Lubricants*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/lubricants13040169>
- Santana, N. da S., Silva, G. A., Mothé, C. G., & Mothé, M. G. (2022). Evaluation of lubricating oil in marine diesel engine using thermal analysis, FTIR, and rheology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(23), 13261–13274. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11568-1>
- Tormos, B., Novella, R., Gomez-Soriano, J., García-Barberá, A., Tsuji, N., Uehara, I., & Alonso, M. (2019). Study of the influence of emission control strategies on the soot content and fuel dilution in engine oil. *Tribology International*, 136, 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.066>
- Totten, G. E., Shah, R. J., & Forester, D. R. (2019). *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing, 2nd Edition*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/MNL37-2ND-EB>
- Valvoline. (2021). *Valvoline Premium Blue 7800 Plus (Cummins endorsed)*. Valvoline Heavy Duty. <https://valvoline-hd.com/productos/aceite-motor-diesel/importado-pb-7800.html>
- van de Voort, F. R. (2022). FTIR Condition Monitoring of In-Service Lubricants: Analytical Role and Quantitative Evolution. *Tribology Online*, 17(3), 144–161. <https://doi.org/10.2474/trol.17.144>
- Wolak, A., & Krasodowski, W. (2025). Reducing Oil Waste Through Condition-Based Maintenance: A Diagnostic Study Using FTIR and Viscosity Monitoring. *Sustainability (Switzerland)*, 17(18). <https://doi.org/10.3390/su17188214>
- Wolak, A., Krasodowski, W., & Zajac, G. (2020a). FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions. *Friction*, 8(5), 995–1006. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0344-9>
- Wolak, A., Krasodowski, W., & Zajac, G. (2020b). FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions. *Friction*, 8(5), 995–1006. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0344-9>
- Wolak, A., Molenda, J., Zajac, G., & Janocha, P. (2021). Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy.

Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 186.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110141>

Wong, V. W., & Tung, S. C. (2016). Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. In *Friction* (Vol. 4, Number 1). Tsinghua University Press.
<https://doi.org/10.1007/s40544-016-0107-9>

Zhou, K., Che, X., Wei, C., Tang, Z., Yu, H., Wang, D., Wang, J., & Zhang, L. (2024). The Molecular Modeling, Simulation, and Design of Base Oils and Additives in Lubricating Oils: A Review. *Processes*, 12(11), 2407.
<https://doi.org/10.3390/pr12112407>

11. ANEXOS

11.1 Enfoque de apoyo metodológico

11.1.1 Anexo A

Tabla de resultados de viscosidad cinemática a 40 °C y 100 °C de las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM D445)

ID_muestra	Origen	Viscosity@40C	Viscosity@100C
AMA1105_74_AC	Vehículo	98	15.38
AMA1499_15_AC	Vehículo	98.1	15.54
AMA1499_15	Vehículo	94.19	14.92
AMA1093_62	Vehículo	104.4	16.15
AMA1094_61_AC	Vehículo	64.18	14.05
AMA1097_67_AC	Vehículo	84.83	13.79
AMA1097_67	Vehículo	69.47	15.38
AMA1104_69	Vehículo	99.63	15.51
28-10-2025_T_new	Tanque-Barril	87.92	13.96
28-10-2025_M_new	Tanque-manguera	88.55	14.02
13-10-2025_T	Tanque-Barril	87.95	14.02
13-10-2025_M	Tanque-Manguera	90.72	14.25
10-10-2025_T	Tanque-Barril	89.82	14.18
10-10-2025_M	Tanque-Manguera	89.86	14.17
23-10-2025_T	Tanque/Barril	87.36	13.63

Nota. Los valores de viscosidad cinemática se expresan en mm²/s (cSt). Las mediciones se realizaron conforme a la norma ASTM D445.

11.1.2 Anexo B

Tabla de resultados de TAN y TBN de las muestras de aceite lubricante analizadas
(ASTM D664 / ASTM D2896)

ID_muestra	Origen	TAN	TBN
AMA1105_74_AC	Vehículo	0.82	9.36
AMA1499_15_AC	Vehículo	0.9	9.91
AMA1499_15	Vehículo	1.35	10.22
AMA1093_62	Vehículo	0.75	9.97
AMA1094_61_AC	Vehículo	0.85	20.05
AMA1097_67_AC	Vehículo	2.65	12.67
AMA1097_67	Vehículo	2.24	31.12
AMA1104_69	Vehículo	1.48	9.34
28-10-2025_T_new	Tanque/Barril	0.3	10.93
28-10-2025_M_new	Tanque/Manguera	0.28	10.9
13-10-2025_T	Tanque/Barril)	0.3	10.89
13-10-2025_M	Tanque/Manguera	0.27	10.49
10-10-2025_T	Tanque/Barril	0.33	10.55
10-10-2025_M	Tanque/Manguera	0.36	10.48
23-10-2025_T	Tanque/Barril	0.12	9.69

Nota. Los valores de TAN y TBN se expresan en mg KOH/g. El TAN fue determinado conforme a ASTM D664 y el TBN conforme a ASTM D2896. Las muestras de almacenamiento corresponden a aceite base utilizado como referencia para la evaluación del estado del lubricante en servicio.

11.1.3 Anexo C

Tabla de los indicadores FTIR de oxidación, nitración, subproductos de sulfatación y hollín de las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM E2412)

ID_muestra	Origen	Oxidation DT - E2412	Nitration DT - E2412	Sulf. By- Prod. DT - D7415A	Soot DT - E2412
AMA1105_74_AC	Vehículo	8.74	5.56	16.32	0.92
AMA1499_15_AC	Vehículo	7.17	5.45	15.88	1.21
AMA1499_15	Vehículo	8.79	6.05	16.69	1.21
AMA1093_62	Vehículo	8.75	6.04	18.05	1.45
AMA1094_61_AC	Vehículo	8.21	7.8	24.19	3.02
AMA1097_67_AC	Vehículo	10.98	8.53	21.29	2.79
AMA1097_67	Vehículo	7.98	9.27	26.75	2.78
AMA1104_69	Vehículo	9.26	6.72	18.09	1.76
28-10-2025_T_new	Tanque-Barril	7.68	3.61	13.82	0
28-10-2025_M_new	Tanque- Manguera	7.58	3.61	13.91	0
13-10-2025_T	Tanque-Barril	7.74	3.65	14.04	0
13-10-2025_M	Tanque- Manguera	8.65	3.69	14.96	0
10-10-2025_T	Tanque-Barril	8.6	3.69	15.08	0
10-10-2025_M	Tanque- Manguera	8.49	3.65	14.87	0
23-10-2025_T	Tanque/Barril	7.03	3.39	13.36	0

Nota. Valores de absorbancia relativa según ASTM E2412; subproductos de sulfatación conforme a ASTM D7415A. El aceite base presenta hollín nulo, confirmando su condición de referencia.

11.1.4 Anexo D

Gráfica de los indicadores de aditivos (tendencia por FTIR) de las muestras de aceite lubricante analizadas

ID_muestra	Origen	ZDDP	Phenol	Amine
		Antiwear	AO	AO
AMA1105_74_AC	Vehículo	0.52	0.19	0.54
AMA1499_15_AC	Vehículo	0.64	0.13	0.55
AMA1499_15	Vehículo	0.62	0	0.58
AMA1093_62	Vehículo	0.49	0.56	0.34
AMA1094_61_AC	Vehículo	0	0	0
AMA1097_67_AC	Vehículo	0.33	0	0.58
AMA1097_67	Vehículo	0	0	0
AMA1104_69	Vehículo	0.45	0.16	0.5
28-10-2025_T_new	Tanque-Barril	0.46	0.09	0.52
28-10-2025_M_new	Tanque-Manguera	0.44	0.09	0.5
13-10-2025_T	Tanque-Barril	0.46	0.13	0.53
13-10-2025_M	Tanque-Manguera	0.5	0.28	0.59
10-10-2025_T	Tanque-Barril	0.5	0.26	0.61
10-10-2025_M	Tanque-Manguera	0.5	0.24	0.59
23-10-2025_T	Tanque-Barril	0.43	0.11	0.45

Nota. Los valores corresponden a indicadores relativos de tendencia obtenidos por FTIR

11.1.5 Anexo E

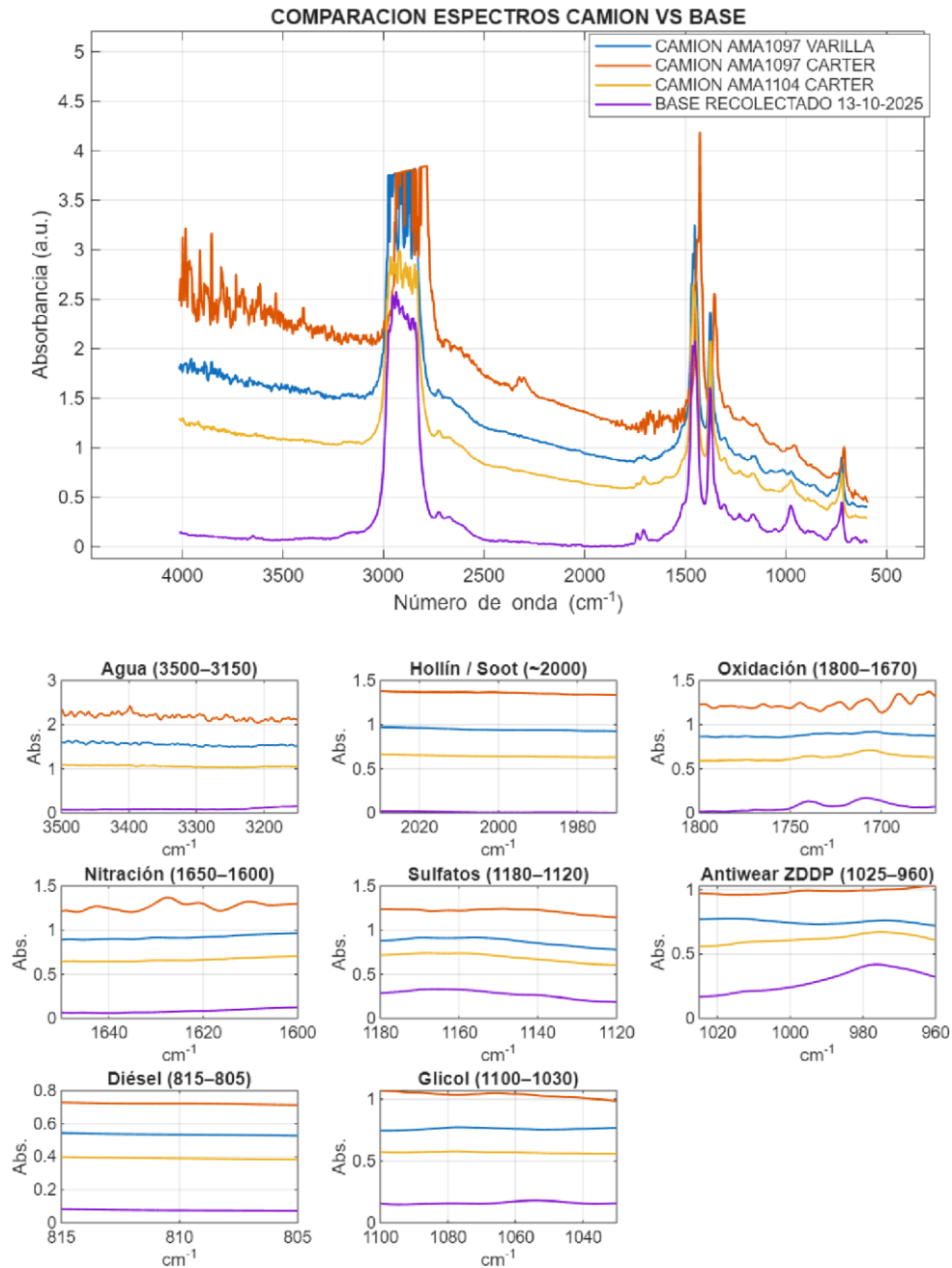
Tabla de contenido de agua determinado por FTIR en las muestras de aceite lubricante analizadas (ASTM E2412)

ID_muestra	Origen	Contenido de agua (ppm)
AMA1105_74_AC	Vehículo	10,5
AMA1499_15_AC	Vehículo	11,8
AMA1499_15	Vehículo	16,6
AMA1093_62	Vehículo	13,2
AMA1094_61_AC	Vehículo	136,4
AMA1097_67_AC	Vehículo	83,7
AMA1097_67	Vehículo	83,7
AMA1104_69	Vehículo	29
28-10-2025_T_new	Tanque-Barril	12,2
28-10-2025_M_new	Tanque- Manguera	11,2
13-10-2025_T	Tanque-Barril	11,2
13-10-2025_M	Tanque- Manguera	10,4
10-10-2025_T	Tanque-Barril	12,3
10-10-2025_M	Tanque- Manguera	10,8
23-10-2025_T	Tanque-Barril	11,5

Nota. Contenido de agua en ppm determinado por FTIR según ASTM E2412. Las muestras de almacenamiento corresponden a aceite base de referencia y las de motor a condiciones reales de operación.

11.1.6 Anexo F

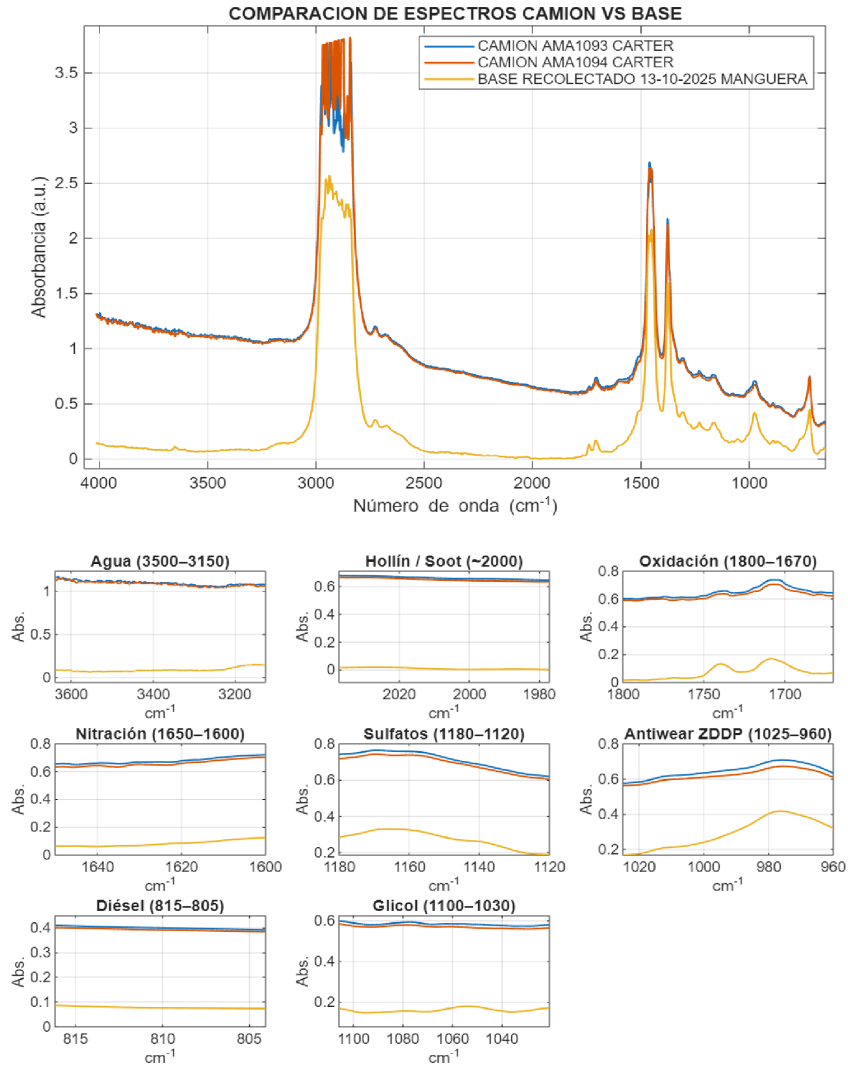
Figura de la comparación de espectros FTIR completos y regiones características ASTM E2412 entre muestras de aceite en servicio de los camiones AMA1097 y AMA1104 y aceite base de referencia.



Nota. Las regiones espectrales mostradas corresponden a los principales indicadores de degradación del aceite lubricante definidos en la norma ASTM E2412.

11.1.7 Anexo G

Figura de la comparación de espectros FTIR completos y regiones características ASTM E2412 entre muestras de aceite en servicio del camión AMA1105 y aceite base de referencia.



Nota. Los espectros se obtuvieron con el equipo ERASPEC OIL.

11.2 Anexo H

Imagen del vehículo de la flota utilizado en el proceso de muestreo de aceite lubricante.



Nota. Imagen del vehículo de la flota durante actividades de mantenimiento, en el cual se realizó la toma de muestras de aceite lubricante utilizadas para el análisis experimental del estudio.

11.2.1 Anexo I

Imagen de la toma de muestra de aceite lubricante desde el motor del vehículo de la flota.



Nota. Procedimiento de muestreo realizado mediante bomba manual para la recolección de aceite lubricante directamente desde el motor, como parte del proceso experimental del estudio.

11.3 Anexo J

Imagen del sistema de almacenamiento y distribución de aceite lubricante en barriles.



Nota. Área de almacenamiento del aceite lubricante en barriles con sistema de bombeo y distribución, utilizada como fuente de aceite base para la toma de muestras y comparación con el aceite en servicio durante el estudio.

11.4 Anexo K

Imagen de la Manipulación y traslado de barril de aceite lubricante en el área de almacenamiento.



Nota. Procedimiento de manipulación y posicionamiento de barriles de aceite lubricante en el sistema de almacenamiento y distribución, como parte de las actividades previas a la toma de muestras del aceite base utilizado en el estudio.

11.5 Anexo L

Imagen de resultados del análisis FTIR obtenidos mediante el equipo ERASPEC OIL.



Parametro	Valor	Unidad	Mostrar todo
Oxidation DT - E2412	10,40	A/cm	DT
Oxidation-A SS - E2412	4,70	A/cm	SS
Nitration DT - E2412	6,42	A/cm	DT
Nitration - SS - E2412	4,53	A/cm	SS
Sulfation SS - E2412	3,69	A/cm	SS
Gasolina	0,95	w%	SS
ZDDP Antwear	79,94	w%	DT
Remaining ZDDP AW	79,94	%	DPL
Phenol AO	0,00	w%	DT Im 0
Remaining Phenol AO	0,00	%	DPL Sep
Amine AO	0,90	w%	DT
Remaining Amine AO	82,09	%	DPL

ANADIR IMPRIMIR ESPECTRO

Nota. Pantalla del equipo ERASPEC OIL mostrando los parámetros espectrales determinados por FTIR, incluyendo oxidación, nitración, sulfatación y aditivos del lubricante, utilizados para la evaluación del estado del aceite en el presente estudio.

11.6 Anexo M

Imagen de la preparación y homogeneización de muestra de aceite lubricante en laboratorio.



Nota. Muestra de aceite lubricante sometida a homogeneización mediante agitador magnético previo al análisis, con el fin de garantizar uniformidad y representatividad durante el proceso experimental.

11.7 Anexo N

Imagen del equipo ERASPEC OIL utilizado para el análisis FTIR de las muestras de aceite lubricante.



Nota. Sistema de análisis por espectroscopía FTIR empleado para la determinación de parámetros de degradación, contaminación y estado del lubricante, como parte del procedimiento experimental del estudio.

11.8 Anexo O

Imagen de la extracción y transferencia de muestra de aceite lubricante para análisis.



Nota. Proceso de transferencia de la muestra de aceite lubricante hacia recipiente de análisis, previo a su evaluación mediante espectroscopía FTIR, garantizando condiciones adecuadas de manipulación durante el procedimiento experimental.

11.9 Anexo P

Imagen del aceite lubricante base utilizado como referencia en el estudio.



Nota. Aceite lubricante Valvoline Premium Blue 7800 Plus SAE 15W-40 empleado como aceite base de referencia para la comparación con las muestras de aceite en servicio durante el análisis experimental.