

Establecimiento de límites de alerta basados en la evolución de los parámetros fisicoquímicos de aceites lubricantes usados en una flota granelera de alto kilometraje que implementa un sistema

EGR

Johanna Carolina Quiñonez Merchán

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Mecánica

Director

Francisco José Saldivia

Magister en Gerencia de Mantenimiento

Codirector

Paula Andrea Cuervo Velásquez

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Dedico este proyecto, en primer lugar, a mis padres por su apoyo inquebrantable y por acompañarme en cada paso de este camino. A mi abuela, quien estuvo presente en cada paso de mi vida. De igual manera, a mis hermanos, Eduardo y Jesús, a quienes admiro profundamente y son mi fuente constante de inspiración para seguir creciendo en todos los ámbitos de mi vida. Finalmente, y no menos importante, a una de mis personas favoritas, Héctor, quien fue un pilar fundamental en esta etapa, brindándome su apoyo, comprensión y cariño, y por creer en mí antes de que yo misma lo hiciera.

Gracias a todos ustedes, porque lo que soy se forma a partir de cada uno. Este logro es tanto suyo como mío.

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Francisco José Saldivia, por su valiosa dirección, orientación y acompañamiento durante esta etapa, brindándome conocimientos y enseñanzas que enriquecieron de manera significativa mi formación profesional. De igual manera, agradezco a la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por ofrecerme los recursos académicos, el entorno formativo y las oportunidades que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

Extiendo también mi gratitud a los ingenieros que confiaron en mí para la realización de este estudio, por su disposición, guía y constante apoyo durante todo el proceso. Finalmente, deseo agradecer a todos los docentes que hicieron parte de mi formación, por compartir su conocimiento, dedicación y compromiso, los cuales fueron fundamentales para alcanzar este logro.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General .....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco teórico .....	18
2.1 Six Sigma en el entorno del mantenimiento .....	18
2.2 Análisis de criticidad.....	19
2.3 Mantenimiento predictivo.....	21
3.3 Análisis de lubricantes .....	21
2.4 ASTM D7720.....	23
2.4.1 Técnica de control de procesos estadísticos (SPC).....	24
2.4.2 Técnica de Distribución Acumulativa .....	26
2.4.3 Pruebas estadísticas.....	30
2.5 Ingeniería de datos .....	32
3. Metodología .....	34
3.1 Tipo de Investigación.....	34
3.2 Recopilación de datos .....	34
3.3 Selección de la flota vehicular critica .....	35
3.3.1 Contextualización de la flota seleccionada .....	36
3.4 Estudio de propiedades Fisicoquímicas de los aceites lubricantes .....	36
3.5 Establecimiento de límites de alarma .....	36

3.5.1 Tratamiento en la base de datos: Aceites lubricantes .....	37
3.5.2 Aplicación de la norma ASTM-D7720.....	38
3.6 Visualización y monitoreo de las propiedades fisicoquímicas .....	38
4. Resultados.....	39
4.1 Flotas operativas .....	39
4.1.1 Análisis preliminar de los costos de mantenimiento por operación .....	41
4.1.2 Análisis de Criticidad de las flotas Operativas .....	42
4.1.3 Análisis interno de las flotas criticas .....	44
4.1.4 Selección de la flota de estudio.....	46
4.2 Flota vehicular Granelera.....	47
4.3 Estudio de propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes .....	50
4.3.1 Comportamiento tribológico del equipo WFC639 .....	51
4.3.1.1 Motor.....	51
4.3.1.2 Diferenciales .....	53
4.3.1.3 Transmisión.....	56
4.3.2 Comportamiento tribológico del equipo GQU374 .....	57
4.3.2.1 Motor.....	57
4.3.2.2 Diferenciales .....	59
4.3.2.3 Trasmisión.....	61
4.3.3 Comportamiento tribológico del equipo XVU729 .....	62
4.3.3.1 Motor.....	62
4.3.3.2 Diferenciales .....	64
4.3.3.3 Transmisión.....	66

4.3.4 Comportamiento tribológico del equipo TAX328.....	68
4.3.4.1 Motor.....	68
4.3.4.2 Diferenciales .....	70
4.3.4.3 Transmisión.....	72
4.4 Establecimiento de límites de alarma .....	74
4.4.1 Tratamiento de la base de datos .....	75
4.4.1.2 Preprocesamiento de datos.....	75
4.4.1.2 Limpieza Preliminar.....	76
4.4.1.3 Datos Faltantes.....	77
4.4.2 Imputación multivariable .....	83
4.4.3 Definición del conjunto de datos .....	86
4.4.4 Caracterización estadística de las propiedades .....	87
4.4.5 Exploración de datos según su causa: Comunes y especiales.....	89
4.4.6 Técnica Distribución Acumulativa .....	98
4.5 Sistema de monitoreo de las propiedades fisicoquímicas.....	109
5. Conclusiones.....	115
6. Recomendaciones .....	117
Referencias.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Apéndice .....	125

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla1. Parámetros de caracterización de aceites lubricantes .....	22
Tabla2. Valoración de técnicas de acuerdo a la proporción de datos faltantes.....	33
Tabla 3. Unidades por Operación .....	40
Tabla4. Costos de mantenimiento por operación.....	41
Tabla5. Criterios de criticidad.....	42
Tabla6. Puntuación de parámetros en flotas operativas.....	43
Tabla7. Subflotas vehicular en Primera Milla .....	44
Tabla8. Subflotas vehicular en Avícola .....	45
Tabla9. Costos por subflotas Avícola .....	46
Tabla10. Información general de la flota granelera .....	47
Tabla 11. Caracterización de los motores de la flota granelera .....	49
Tabla 12. Cantidad de muestras por componente .....	74
Tabla 13 Muestras por laboratorios del motor .....	81
Tabla 14. Muestras por laboratorios de diferenciales y transmisión .....	82
Tabla 15. Datos faltantes en el motor .....	84
Tabla 16. Test de Wilcoxon.....	85
Tabla 17. Prueba de Homocedasticidad.....	86
Tabla 18. Prueba A-D en la Viscosidad.....	88
Tabla 19. Estadística descriptiva del motor .....	89
Tabla 20. Límites de la regla de Tukey en el Motor .....	90
Tabla 21. Estadística Descriptiva para la transmisión .....	93

Tabla 22. Límites de Tukey en la transmisión.....	94
Tabla 23. Estadística descriptiva para el diferencial trasero.....	95
Tabla 24. Límites de Tukey en el diferencial trasero.....	95
Tabla 25. Estadística en el diferencial frontal.....	96
Tabla 26. Límites de Tukey en diferencial frontal.....	97
Tabla 27. Limites condenatorios del motor .....	100
Tabla 28. Límites de alarma para el motor (Viscosidad-TBN) .....	103
Tabla 29. Intervenciones mayores en los sistemas de engranajes .....	104
Tabla 30 Límites de alarma en el diferencial frontal .....	105
Tabla 31. Límites de alarma para el diferencial trasero.....	105
Tabla 32. Limites condenatorios en la viscosidad en los diferenciales .....	107
Tabla 33 Limites condenatorios de la transmisión .....	108
Tabla 34. Limites condenatorios para la viscosidad de la transmisión.....	109

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Matriz de criticidad.....	20
Figura 2. Relación entre elementos presentes en el aceite y sus posibles orígenes .....	23
Figura 3. Distribución de datos parámetros .....	25
Figura 4. Distribución de frecuencia discreta sesgada.....	27
Figura 5. Distribución de frecuencia continua sesgada de referencia basada en cero .....	28
Figura 6. Distribución de frecuencia continua sesgada de referencia alta .....	29
Figura 7. Distribución de frecuencia discreta sesgada.....	30
Figura 8. Interfaz del aplicativo AUTOMOTRIZ VF .....	35
Figura 9. Matriz de Criticidad.....	43
Figura. 10 Costo por kilómetro de las subflotas .....	46
Figura 11. Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del WFC639 .....	51
Figura12. Base consolidada del diferencial frontal del WFC639 .....	54
Figura 13 Base consolidada del diferencial trasero del WFC639.....	55
Figura 14. Base recopilada de la transmisión del WFC639.....	56
Figura 15. Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del GQU374.....	58
Figura16. Evolución del comportamiento en el diferencial frontal del GQU374.....	59
Figura 17. Evolución del comportamiento en el diferencial trasero del GQU374 .....	60
Figura 18. Base consolidada de la transmisión del GQU374 .....	61
Figura 19 Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del XVU729.....	63
Figura22. Evolución del comportamiento del lubricante en el diferencial frontal del XVU729. 64	64
Figura23. Evolución del comportamiento del lubricante en el diferencial trasero del XVU729 65	65

Figura 22. Evolución del comportamiento del lubricante en la transmisión del XVU729.....	67
Figura 23. Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del TAX328 .....	69
Figura 24. Base consolidada del diferencial frontal en el equipo TAX328.....	71
Figura 25. Base consolidada del diferencial trasero del TAX328 .....	72
Figura 26. Evolución del comportamiento del lubricante en la transmisión del TAX328 .....	73
Figura 27 Caracterización preliminar de las data .....	75
Figura 28. Propiedades por debajo del límite de detección .....	76
Figura 29 Valores ausentes en la base de datos .....	77
Figura 30 Patrón de datos faltantes.....	78
Figura 31 Patrón de valores faltantes en las muestras analizadas por el laboratorio responsable del análisis de motores.....	79
Figura 32. Comportamiento de los valores faltantes en las muestras analizadas por el laboratorio 2.....	80
Figura 33. Interfaz de la CDF .....	98
Figura 36. Límites de la flota granelera en la actualidad.....	102
Figura 35. Base de datos diferenciales.....	107
Figura 36. Base de datos del laboratorio 1.....	110
Figura 37. Base de datos del laboratorio 2.....	110
Figura 38. Base consolidad de las muestras analizadas.....	111
Figura 39. Interfaz seguimiento de las propiedades del lubricante.....	112
Figura 40. Interfaz App Script .....	113
Figura 41. Gmail de alerta .....	114

**Lista de Apéndice**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Proporción de costos de mantenimiento por operación .....	125
Apéndice B. Análisis de muestras virgen .....	125
Apéndice C. Plan de mantenimiento de la flota granelera.....	125
Apéndice D. Codificación en Rstudio .....	126
Apéndice E. Regla Tukey en R.....	127
Apéndice F. Codificación de tratamiento e imputación.....	127
Apéndice G. Codificación de alarmas .....	133

### Resumen

**Título:** Establecimiento de límites de alerta basados en la evolución de los parámetros fisicoquímicos de aceites lubricantes usados en una flota granelera de alto kilometraje que implementa un sistema EGR.\*

**Autor:** Johanna Carolina Quiñonez Merchán\*\*

**Palabras Clave:** Mantenimiento predictivo, lubricantes, análisis de datos, equipos graneleros.

**Descripción:** Este proyecto se centra en el análisis de la flota de vehículos pesados de una empresa avícola colombiana, con el objetivo de identificar un grupo de vehículos críticos e implementar un estudio sobre la evolución de las propiedades fisicoquímicas de las muestras analizadas en los componentes del tren motriz. Esto permite establecer un proceso de monitoreo confiable, que facilite la intervención oportuna de los equipos y optimice la gestión de los aceites lubricantes, fortaleciendo la planificación del área de mantenimiento. El estudio se desarrolla aplicando la norma ASTM D7720, y para garantizar el cumplimiento de sus lineamientos se implementan procesos avanzados de tratamiento de datos, incluyendo modelos de imputación MICE, análisis de consistencia y pruebas estadísticas que aseguran la validez y confiabilidad de la información. Además, ciertos análisis se extrapolan a la norma ASTM D6299 para seleccionar la técnica estadística más adecuada, generando límites de alarma significativos y confiables que respalden la toma de decisiones. De manera complementaria, se diseña una interfaz interactiva que centraliza la información de las muestras, facilita la consulta en tiempo real y genera alertas automáticas ante comportamientos anómalos, fortaleciendo la confiabilidad de los equipos y proporcionando herramientas efectivas para la gestión predictiva del mantenimiento.

---

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Pregrado en Ingeniería Mecánica. Director: Francisco José Saldivia. Codirector: Paula Andrea Cuervo Velásquez. PhD.

**Abstract**

**Title:** Establishment of Alert Limits Based on the Evolution of Physicochemical Parameters of Used Lubricating Oils in a High-Mileage Bulk Fleet Implementing an EGR System\*

**Author(s):** Johanna Carolina Quiñonez Merchán\*\*

**Key Words:** Predictive maintenance, lubricants, data analysis, bulk transport equipment.

**Description:** This project focuses on the analysis of the heavy-duty vehicle fleet of a Colombian poultry company, aiming to identify a group of critical vehicles and conduct a study on the evolution of the physicochemical properties of used oil samples from powertrain components. This approach enables the establishment of a reliable monitoring process that facilitates timely equipment intervention and optimizes lubricant management, thereby strengthening maintenance planning. The study is carried out following the ASTM D7720 standard, and to ensure compliance with its guidelines, advanced data processing techniques are applied, including MICE imputation models, consistency analysis, and statistical tests that ensure the validity and reliability of the information. Additionally, certain analyses are extrapolated to the ASTM D6299 standard to select the most appropriate statistical technique, generating meaningful and reliable alarm limits that support decision-making. Complementarily, an interactive interface is designed to centralize sample information, enable real-time queries, and generate automatic alerts in response to abnormal trends, thereby enhancing equipment reliability and providing effective tools for predictive maintenance management.

---

\* Degree Work.

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Degree in Mechanical Engineering. Director: Francisco José Saldivia. Codirector: Paula Andrea Cuervo Velásquez. PhD.

## Introducción

En la industria avícola, la producción masiva de huevos y la gestión de grandes cantidades de aves representan desafíos operativos significativos. Entre estos, la gestión del alimento es una de las tareas más críticas, ya que requiere una logística eficiente para garantizar el abastecimiento oportuno en diferentes ubicaciones. En este proceso se involucran múltiples áreas de una organización, entre ellas el área de mantenimiento automotriz, responsable de garantizar la confiabilidad y disponibilidad operativa de los equipos involucrados. En este contexto, se distinguen dos flotas, una de estas es la flota granelera, encargada de transportar el alimento desde la planta a cada uno de los galpones; el no contar con la disponibilidad de estos vehículos hace imposible garantizar el alimento para las pollitas afectando su desarrollo y la producción de huevos.

Los graneleros de una compañía avícola colombiana, que por motivos de confidencialidad no será mencionada explícitamente, han presentado diversas problemáticas debido a las exigentes condiciones operativas a las que están expuestas diariamente y a su avanzado ciclo de vida, contando con valores cercanos y/o superiores al millón de kilómetros e incorporan tecnología de postratamiento en respuesta a las normativas medioambientales que exigen la reducción de emisiones de gases NOx. Así mismo, lo integran motores Cummins conocidos por ser formadores de hollín (castillo, Motores Cummins, 2024), factores que, en conjunto, inciden significativamente a la degradación de las condiciones operativas de la flota, afectando la eficiencia y fiabilidad de la misma.

En el último año, el área de mantenimiento automotriz ha experimentado un incremento en los costos provenientes de mantenimientos correctivos no programadas a pesar de que las flotas han estado en diversas intervenciones de mayor nivel(overhaul), situación que ha tenido un

impacto negativo en la economía de la empresa, especialmente cuando se suma el hecho de contar con un número limitado de camiones disponibles en ciertas operaciones. Esta combinación de factores ha disminuido significativamente los tiempos de operación esperados, lo que ha dado resultado a presentar un costo por kilómetro (CPK) elevado en comparación con empresas similares, como FRIMAC (castillo, 2024). Este comportamiento se debe en parte, por la ineficiente toma de decisiones relacionadas con las intervenciones provocando un mal uso de los recursos, producto del desconocimiento del estado real de los vehículos lo que ha llevado a que más del 50% del presupuesto en los últimos años sea destinado a acciones correctivas (castillo, 2025).

Según (Arboleba, 2021) el funcionamiento satisfactorio de una determinada parte de un equipo o del mismo, depende del uso del aceite con las propiedades adecuadas para las condiciones funcionales estimadas. En este sentido, realizar un control y monitoreo de las condiciones del lubricante permite la toma de acciones proactivas de acuerdo a las condiciones presentes en la flota vehicular. Esto se logra mediante la definición de límites permisibles para las concentraciones de las propiedades fisicoquímicas del lubricante, los cuales generalmente son establecidos por los fabricantes. Sin embargo, estos valores suelen ser conservadores y aplicables de manera genérica, principalmente para flotas nuevas, y no siempre reflejan las condiciones operativas específicas de cada vehículo. Por lo tanto, ¿Cómo establecer límites de alarma en las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes basados en las condiciones operativas en una flota vehicular, con el fin de optimizar la gestión del mantenimiento?

En la actualidad, el uso de herramientas predictivas ha sido de gran ayuda para pronosticar el fallo de un equipo o componente permitiendo tomar acción antes de que este falle logrando reducir los tiempos muertos, alargar la vida útil del mismo, maximizar la reducción de costos operativos y optimizar las horas hombre dedicadas al mantenimiento. En el ámbito industrial, se

tienen diversas técnicas entre las cuales se destaca el análisis de lubricantes que permite identificar la salud de ciertos componentes por medio de la cuantía de parámetros como la viscosidad, la presencia de contaminantes y el desgaste de componentes, empleando técnicas como la espectrometría de emisión atómica. Sin embargo, para lograr una interpretación fiable de estos parámetros se debe tener un valor base adecuado al comportamiento real del equipo. Por lo tanto, este proyecto tiene como propósito estudiar una flota crítica tomando en cuenta el historial de intervenciones y especificaciones de diseño de los componentes para establecer límites estadísticos de alarma que permitirá tomar decisiones para mejorar la gestión y confiabilidad de la flota. Con ello, se optimizarán los recursos, se garantizará una mayor fiabilidad operativa y asegurando la sostenibilidad y eficiencia del proceso de mantenimiento

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Determinar los límites de los aceites lubricantes usados en la flota granelera de alto kilometraje que implementa un sistema EGR, con base a los resultados de los análisis históricos de las propiedades fisicoquímicas con el fin de establecer criterios de monitoreo y gestión del lubricante.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la data de los vehículos de la entidad, mediante la recopilación y análisis de indicadores de costos, para identificar la flota más crítica.
- Estudiar para los vehículos críticos el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas relevantes en la empresa mediante los datos proporcionados por los laboratorios del aceite en el motor, diferencial/es y transmisión, con el fin de mejorar la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento en el área automotriz.
- Establecer un conjunto de límites condenatorios clasificados en óptimo, alerta y crítico basados en la concentración de las propiedades fisicoquímicas del aceite y su condición operativa de acuerdo con la norma ASTM D7720.
- Diseñar una herramienta que permita la recopilación de datos, análisis y visualización de las propiedades del aceite, de la misma forma que alerte a los usuarios permitiéndoles realizar una intervención oportuna.

## 2. Marco teórico

La gestión eficiente del mantenimiento en la industria moderna es un factor determinante para garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los activos, así como para controlar los costos operativos asociados. En este contexto, las estrategias de mantenimiento han evolucionado desde un enfoque correctivo hacia un enfoque preventivo y predictivo, apoyado en metodologías estructuradas y herramientas analíticas. El presente marco teórico explora conceptos clave que sustentan la gestión avanzada del mantenimiento, incluyendo metodologías de mejora de procesos, análisis de criticidad, mantenimiento predictivo y evaluación de lubricantes.

### 2.1 Six Sigma en el entorno del mantenimiento

El enfoque Six Sigma se fundamenta en una metodología estructurada que permite identificar y reducir defectos en los procesos, determinar sus causas y aplicar mejoras sostenibles. Su aplicación se organiza principalmente bajo el ciclo DMAIC, el cual constituye la base para lograr la mejora de los procesos y reducir notablemente los errores. Este ciclo corresponde a la abreviatura en inglés de las fases y se definen de la siguiente manera:

- Define (Definir): identificación clara del problema y delimitación del alcance del proyecto.
- Measure (Medir): Recopilación de información y evaluación del rendimiento actual del proceso para establecer una línea base cuantitativa.
- Analyze (Analizar): Determinación de las causas más significativas de los problemas a partir del análisis de los datos recopilados.
- Improve (Mejorar): Implementación de acciones y mejoras orientadas a eliminar las causas raíz previamente identificadas.

- Control (Controlar): Establecimiento de mecanismos de seguimiento para mantener las mejoras alcanzadas y garantizar que el proceso no retroceda a su estado inicial.

En el contexto del mantenimiento, este método permite identificar las debilidades en los flujos de trabajo, lo que facilita la implementación de estrategias que incrementan la confiabilidad y disponibilidad de los activos (Tanya Goncalves, 2022). La adopción de este enfoque contribuye directamente a la mejora de indicadores clave de gestión, tales como el aumento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), la reducción del Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y la disminución de los costos de mantenimiento.

Uno de los indicadores fundamentales en la gestión de flotas es el costo asociado a mantener un vehículo en operación. Para este propósito se utiliza el Costo por Kilómetro (CPK), el cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$CPK = \frac{\text{Costo totales}}{\text{Kilometros recorridos}} \quad (1)$$

Los Costos totales corresponden a la suma de costos fijos y variables, mientras que el cálculo debe realizarse dentro de un periodo de tiempo definido, de manera que exista coherencia con los costos efectivamente incurridos en dicho intervalo.

## **2.2 Análisis de criticidad**

El análisis de criticidad es un enfoque metódico orientado a identificar los activos más relevantes mediante la evaluación de los riesgos potenciales y sus impactos asociados. En el ámbito del mantenimiento, esta herramienta se utiliza como criterio para priorizar activos dentro de la planificación, de modo que los recursos se dirijan hacia aquellos equipos cuyo fallo tendría mayores consecuencias en la operación

La aplicación de este análisis depende de las características de cada área operativa, por lo que tanto las categorías de evaluación como su ponderación pueden variar según el contexto. Una vez definidas dichas categorías, se asigna un peso relativo a cada una, lo que permite calcular un índice de criticidad por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Criticidad: Frecuencia de fallas} * \text{Consecuencia} \quad (2)$$

Donde:

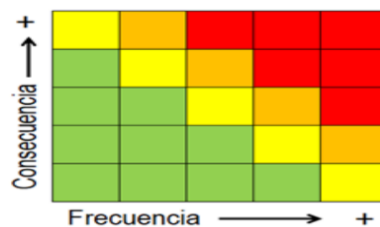
- Frecuencia de fallas: Intervalo ponderado de fallas registradas.
- Consecuencia: Impacto global derivado de la ocurrencia de una falla, e integra factores operativos, económicos y ambientales. Su cálculo se realiza a través de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Consecuencia: } & (\text{Impacto operacional} * \text{Flexibilidad operativa}) \\ & + \text{costos de mantenimiento} + \text{impacto ambiental} \end{aligned} \quad (3)$$

En donde, el impacto operacional refleja cuánto afecta la falla la continuidad y eficiencia del proceso, la flexibilidad operativa indica la capacidad de adaptación de la organización, los costos de mantenimiento comprenden reparaciones, repuestos y mano de obra, y el impacto ambiental considera los efectos negativos sobre el entorno. Con base en este cálculo, los equipos se jerarquizan en la matriz de criticidad según los valores obtenidos.

### Figura 1

*Matriz de criticidad*



*Nota.* Estructura de la matriz de criticad para la jerarquización de activos, adaptado de “infomante por soporte y compañía, 2022”.

### **2.3 Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento preventivo es definido por adoptar acciones mediante el monitoreo de la condición de un equipo mediante la recopilación y análisis continuo de datos sobre el rendimiento para identificar patrones y anomalías que puedan indicar una posible falla o degradación del mismo. De acuerdo con (Fractal, 2024) la implementación de un mantenimiento predictivo puede dividirse principalmente en tres fases:

1. **Data collection:** Proceso de registro sistemático y continuo de información relevante sobre el estado y rendimiento de los activos, utilizando diversas tecnologías.
2. **Data mining:** Técnica analítica que permite descubrir patrones, tendencias y relaciones significativas en grandes volúmenes de datos históricos, utilizando algoritmos y métodos estadísticos para extraer información valiosa de los equipos a lo largo del tiempo.
3. **IA y Machine Learning:** Desarrollo de algoritmos capaces de predecir el comportamiento de los activos mediante la identificación de patrones y tendencias, a través del entrenamiento constante de modelos con datos históricos.

### **3.3 Análisis de lubricantes**

Es un enfoque sistemático de diagnóstico orientado a la evaluación de la condición operativa de un equipo a partir del estado del aceite lubricante. Este proceso proporciona información al examinar las propiedades fisicoquímicas mediante técnicas como la espectrometría, el conteo de partículas y la medición de la viscosidad (Noria, Análisis de aceite , 2024).

El análisis de aceite se clasifica en tres categorías principales: propiedades de fluidos, contaminación y partículas de desgaste obtenidas mediante un análisis elemental, reflejadas a continuación:

**Tabla 1**

*Parámetros de caracterización de aceites lubricantes*

Clasificación	Propiedades	Unidad de Medición	Clasificación	Propiedades	Unidad de Medición	
Metales de Desgaste	Hierro	ppm	Metales contaminantes	Silicio	ppm	
	Cromo	ppm		Sodio	ppm	
	Niquel	ppm		Potasio	ppm	
	Metales de Desgaste	Aluminio	ppm	Fuente de varios metales	Titanio	ppm
		Cobre	ppm		Molibdeno	ppm
		Plomo	ppm		Antimonio	ppm
		Estaño	ppm		Manganeso	ppm
		Cadmio	ppm		Litio	ppm
		Plata	ppm		Boro	ppm
Vanadio		ppm				
Metales Aditivos	Magnesio	ppm	Propiedades del Fluido	Viscosidad 100 C	cSt	
	Calcio	ppm		Numero de acidez (TAN)	mg KOH/g	
	Bario	ppm		Numero de basicidad (TBN)	mg KOH/g	
	Fosforo	ppm		Nitración	Abs/cm	
Contaminantes	Zinc	ppm	Sulfatación	Abs/cm		
	Hollin	ppm	Oxidación	Abs/cm		
	Dilución de Combustible	%				
	Agua	%				

*Nota.* La tabla las propiedades comúnmente analizadas en componentes de maquinaria pesada.

Cada una de las propiedades incluidas en las diferentes clasificaciones de la Tabla 1 puede tener múltiples fuentes de origen, o que hace que la interpretación de los resultados no deba centrarse exclusivamente en mediciones puntuales, sino en el análisis de su comportamiento en el tiempo (Noria, 2024). El estudio de tendencias proporciona una visión más integral del estado del lubricante y del equipo, facilitando la identificación de patrones que permiten rastrear con mayor exactitud el origen de las anomalías observadas. En la figura siguiente se presentan algunos de los posibles orígenes asociados a los elementos analizados:

**Figura 2**

*Relación entre elementos presentes en el aceite y sus posibles orígenes*

Elemento	Posible origen	Elemento	Posible origen
Aluminio	Pistones, rodamientos, bombas, arandelas de empuje	Magnesio	Transmisiones, aditivos detergentes
Antimonio	Rodamientos, grasa	Molibdeno	Anillos de pistones, motores eléctricos, aditivos extrema presión
Bario	Aditivos inhibidores de corrosión de herrumbre y oxidación, grasa	Niquel	Rodamientos, tren de válvulas, álabes de turbina
Boro	Aditivos inhibidores de corrosión en refrigerante, polvo, agua.	Fósforo	Aditivos antidesgastes, aditivos extrema presión para engranajes
Calcio	Aditivos, detergentes, dispersantes	Potasio	Aditivos refrigerantes
Cromo	Anillos de pistones en motores de combustión interna	Plata	Jaulas de rodamientos, dientes de engranajes, etc
Cobre	Rodamientos, aleaciones de bronce o latón, bujes, arandelas de empuje.	Silicio	Polvo/tierra, aditivos antiespumantes
Hierro	Ejes, elementos rodantes de rodamientos, cilindros, engranajes, anillos de pistones	Sodio	Detergente o aditivo de refrigerante
Plomo	Rodamientos, aditivos de combustible, aditivos antidesgaste	Estaño	Cojinetes planos, jaula de rodamientos, soldadura
Litio	Grasa, aditivos	Titanium	Rodamientos, álabes de compresores
		Zinc	Sellos de neopreno, grasa, aditivos antidesgaste

*Nota.* Representa el posible origen de metales de desgaste detectados en una muestra de aceite., tomada de “Noria, Análisis de aceite , 2024”.

La identificación del origen de los elementos presentes en el lubricante constituye una herramienta fundamental ya que permite determinar los componentes comprometidos e implementar prácticas de mantenimiento basadas en condición, tales como la programación oportuna de cambios de aceite y el reemplazo de filtros favoreciendo el desempeño operativo y la longevidad del equipo.

## 2.4 ASTM D7720

La designación D7720 corresponde a una guía estándar para la evaluación estadística de límites de alarma de mensurandos empleados en el análisis de aceite usado para el monitoreo de la condición de equipos. establece lineamientos para evaluar estadísticamente los límites de alarma de los mensurandos en el análisis de aceite usado, con el fin de determinar la gravedad del desgaste, la calidad del lubricante y posibles contaminaciones. Define niveles de alerta (blanco, verde,

amarillo y rojo) que pueden adaptarse según el programa de mantenimiento, y permite establecer límites unilaterales, comparativos o bilaterales según el criterio aplicado.

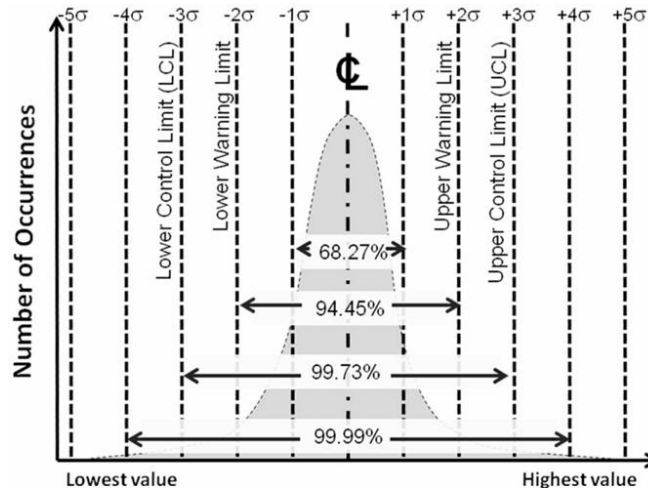
La metodología de evaluación puede llevarse a cabo mediante dos técnicas estadísticas, sin embargo, su aplicación requiere la consideración de aspectos adicionales, tales como:

- Ante una representación incorrecta de información o de datos anómalos se precisa un tratamiento cuidadoso considerando la información disponible de la población de estudio para la toma de decisiones.
- La eliminación de valores únicamente bajo justificación técnica, sustentada en comparaciones históricas o explicaciones ante discrepancias.
- La validación periódica de los límites de alarma, a fin de ajustar posibles desviaciones y mitigar la ocurrencia de falsas alarmas o falsos positivos, preservando la confiabilidad del sistema de monitoreo.

#### ***2.4.1 Técnica de control de procesos estadísticos (SPC)***

Esta técnica es adecuada cuando los datos de los mensurandos son paramétricos y presentan distribución normal bilateral. Para ello, se verifica la normalidad mediante el estadístico Anderson-Darling (A-D), según la práctica ASTM D6299, asegurando que los límites de control sean representativos y estadísticamente válidos.

La relación entre el SPC y los niveles de alarma se fundamenta en el cálculo de las desviaciones estándar ( $\sigma$ ) de la distribución, a partir de las cuales se determinan los umbrales de referencia.

**Figura 3.***Distribución de datos parámetros*

*Nota.* Representa los límites de control y de advertencia superiores e inferiores para un conjunto de datos SPC, tomada de “Guía estándar para la evaluación estadística de los límites de alarma de los mensurandos al utilizar el análisis de aceite para monitorear el estado físico y la contaminación de los equipos y el aceite, 2021”.

De acuerdo con la Figura 3 y lo establecido en la norma, los niveles de control estadístico se interpretan de la siguiente manera:

- Límites de un sigma (One-Sigma Limits): El 68.27% de las observaciones se concentran en esta zona, lo que corresponde a condiciones normales de operación y se equipara con el nivel de alarma blanco.
- Límites de dos sigmas (Warning Limits): El 94.45% es asociado al nivel de alarma verde, el cual indica advertencias iniciales o desviaciones incipientes respecto al comportamiento esperado.

- Límites de tres sigmas (Control Limits): Contiene el 99.73 % y se encuentran asociados a un nivel de alarma rojo, lo cual es indicativo de condiciones anómalas o potencialmente críticas en el sistema.

Esta metodología recomienda identificar y excluir variaciones debidas a causas asignables o especiales que superen el umbral de seis sigmas, dado que tales valores no representan la variabilidad natural del proceso y pueden distorsionar la evaluación de límites.

#### ***2.4.2 Técnica de Distribución Acumulativa***

Esta técnica se recomienda para bases de datos que no presentan un perfil estadístico normal. Es aplicable a cualquier conjunto de datos, en especial cuando la distribución de frecuencias se encuentra sesgada, presenta una sola cola y/o incorpora variaciones atribuibles a causas especiales. La metodología se fundamenta a partir de la determinación de niveles porcentuales mediante un gráfico de distribución acumulativo (CDF), en donde dichos niveles se calculan mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{\%}{100} * N \quad (4)$$

En donde, % corresponde al nivel porcentual de interés, y N es el número total de muestras disponibles para cada mensurado.

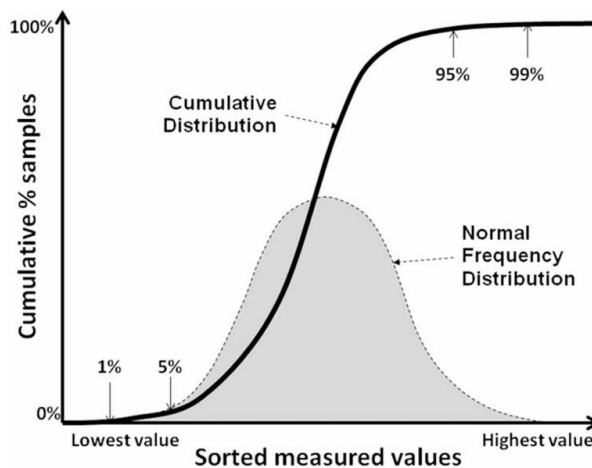
La selección de los niveles porcentuales se realiza considerando el comportamiento y caracterización de la base de datos analizada. Sin embargo, se deben tener en cuenta que una deficiente agrupación, en la que se incluyen equipos con características o funciones operativas muy heterogéneas, puede comprometer la confiabilidad, relevancia y precisión estadística de los límites definidos.

De acuerdo con la norma ASTM D7720, las propiedades fisicoquímicas presentan determinados patrones asociados a la naturaleza del mismo, los cuales deben evaluarse para el establecimiento de límites de alarma. Estos patrones se clasifican de la siguiente manera:

1. Distribución Acumulativa de Doble Cola con Datos Continuos (Double-Tail Cumulative Distribution with Continuous Data), y es representada de la siguiente manera:

#### Figura 4

*Distribución de frecuencia discreta sesgada*



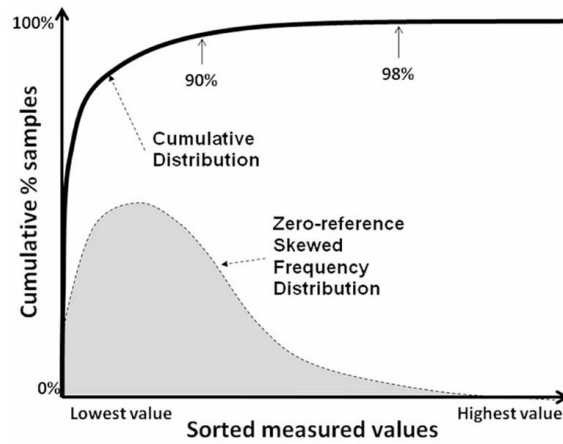
*Nota.* Esta figura representa los porcentajes para el establecimiento de los límites de alarma, tomada de “Guía estándar para la evaluación estadística de los límites de alarma de los mensurandos al utilizar el análisis de aceite para monitorear el estado físico y la contaminación de los equipos y el aceite, 2021”.

Este tipo de distribución se ajusta comúnmente a mediciones de muestras de viscosidad. El uso de límites de alarma, se basan en exteriores, con un nivel de amarillo-rojo, tomando el 99% y 1%. Para un nivel verde-amarillo, se tomando los valores proporcionados por el 95% y 5%.

2. Referencia Basada en Cero, Distribución Acumulativa Sesgada de Cola Única con Datos Continuos (Zero-Based Reference, Single-Tail Cumulative Distribution with Continuous Data)

**Figura 5**

*Distribución de frecuencia continua sesgada de referencia basada en cero*



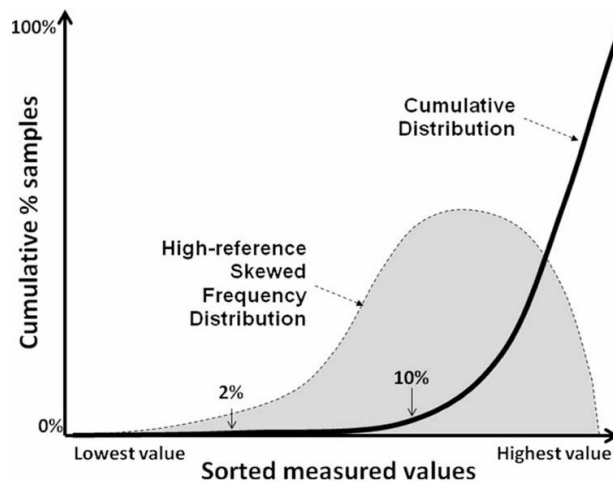
Nota. Esta figura representa los porcentajes para el establecimiento de los límites de alarma de acuerdo a la caracterización del conjunto de datos, tomada de “Guía estándar para la evaluación estadística de los límites de alarma de los mensurandos al utilizar el análisis de aceite para monitorear el estado físico y la contaminación de los equipos y el aceite, 2021”.

Este comportamiento se presenta comúnmente al monitorear características de contaminación y desgaste que no son partes reales del lubricante. Los valores iniciales medidos a menudo son bajos (incluso cero) y luego aumentan a medida que la condición progresa. Esto incluye mensurandos como número ácido (TAN), oxidación y permitividad relativa (ASTM INTERNATIONAL, 2017). Los límites de alarma se basan en la obtención de la posición del P98 representando un nivel amarillo-rojo, y P90 para un nivel verde-amarillo.

3. Referencia Alta, Distribución Acumulativa Sesgada de Cola Única con Datos Continuos (High-Reference, Single-Tail Cumulative Distribution with Continuous Data)

**Figura 6**

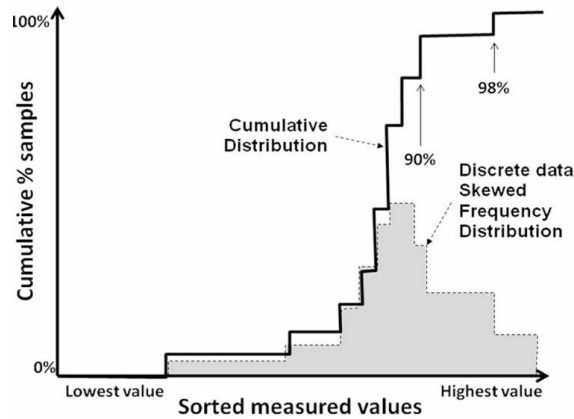
*Distribución de frecuencia continua sesgada de referencia alta*



*Nota.* Esta figura representa los porcentajes para el establecimiento de los límites de alarma, tomada de “Guía estándar para la evaluación estadística de los límites de alarma de los mensurandos al utilizar el análisis de aceite para monitorear el estado físico y la contaminación de los equipos y el aceite, 2021”.

La Figura 6 muestra un comportamiento de parámetros que comienzan altos y disminuyen con el tiempo, como el número básico (TBN) que se reduce debido a la oxidación y el agotamiento de aditivos. Este tipo de población de datos es usualmente no paramétrica (ASTM INTERNATIONAL, 2017). El umbral de alarma en el nivel verde-amarillo cae en el 10%, y para la alerta amarillo-rojo el 2%.

4. Distribución Acumulativa Sesgada Discreta de Cola Única (Single Tail, Skewed Cumulative Distribution with Discrete Data)

**Figura 7***Distribución de frecuencia discreta sesgada*

*Nota.* Esta figura representa los porcentajes para el establecimiento de los límites de alarma, tomada de “Guía estándar para la evaluación estadística de los límites de alarma de los mensurandos al utilizar el análisis de aceite para monitorear el estado físico y la contaminación de los equipos y el aceite, 2021”.

Este tipo de conjuntos de datos se asocia comúnmente con valores de medición codificados cuantificados discretos, como los utilizados frecuentemente para el conteo de partículas. Este tipo de población de datos es usualmente no paramétrica (ASTM INTERNATIONAL, 2017). En cuanto a los límites de alarma, estos presentan los mismo de la Referencia basada en cero.

### **2.3.1 2.4.3 Pruebas estadísticas**

Las pruebas estadísticas constituyen herramientas fundamentales en la validación y análisis de datos experimentales, dado que permiten determinar la confiabilidad de los resultados, identificar patrones de comportamiento y establecer la significancia de las diferencias observadas entre distintos conjuntos de datos. En este contexto, el software RStudio se emplea ampliamente como plataforma de cálculo estadístico, debido a que dispone de múltiples librerías especializadas para el procesamiento de datos, la visualización gráfica y la ejecución de pruebas de hipótesis.

Un concepto clave en la aplicación de estas pruebas es el p-valor (p-value), el cual representa la probabilidad de obtener un resultado tan extremo como el observado bajo el supuesto de la hipótesis nula ( $H_0$ ). En términos prácticos, un p-valor inferior a 0.05 se interpreta como evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula, lo que respalda la existencia de diferencias reales entre los grupos analizados. Este criterio se aplica de forma general en todas las pruebas estadísticas consideradas en este estudio (Saul McLeod, 2025).

Dentro de las pruebas empleadas se destacan las siguientes:

- Prueba de normalidad: Se utiliza para verificar si un conjunto de datos sigue una distribución normal, condición indispensable en la aplicación de técnicas paramétricas y en la validación de diversos supuestos estadísticos. En función de factores como el tamaño muestral y la sensibilidad requerida, existen diversos test entre los cuales se encuentra el Anderson-Darling (A-D), ampliamente reconocido por su robustez (Diana Villasana Ocampo, 2022)
- Prueba de homocedasticidad o igualdad de varianzas: Este tipo de pruebas evalúa si varios grupos de datos presentan varianzas homogéneas, lo cual resulta esencial para la aplicación de pruebas paramétricas comparativas. La verificación de homocedasticidad permite garantizar la consistencia y comparabilidad de los resultados entre diferentes grupos de análisis
- Prueba de muestras relacionadas (Wilcoxon): Se trata de una prueba no paramétrica empleada para comparar dos grupos de datos emparejados o dependientes, como ocurre en mediciones realizadas sobre el mismo individuo antes y después de un tratamiento (Pubs, 2021).

## 2.5 Ingeniería de datos

La ingeniería de datos comprende los procesos de diseño, construcción y optimización de infraestructuras para la adquisición, almacenamiento, procesamiento y análisis de información proveniente de múltiples fuentes y formatos (Informativa, s.f.). Su objetivo es garantizar que los datos, una vez depurados y estructurados, sean aptos para análisis estadísticos y computacionales. Un problema frecuente en este proceso es la presencia de datos faltantes, que reduce la precisión en la estimación de parámetros, introduce incertidumbre y puede afectar la validez de los modelos y conclusiones. Por ello, el tratamiento adecuado de valores ausentes es un paso crítico, y para seleccionar la técnica de imputación más apropiada es necesario identificar el mecanismo que genera la ausencia de datos, clasificado en tres categorías principales:

1. Datos faltantes completamente aleatorios (MCAR – Missing Completely at Random):  
Se presentan cuando la probabilidad de ausencia es independiente tanto de las variables observadas como del valor del dato en sí mismo.
2. Datos faltantes no aleatorios (MNAR – Missing Not at Random): Ocurren cuando la ausencia está directamente relacionada con el valor del dato omitido. En este caso, la pérdida genera un sesgo significativo, por lo que se requiere identificar y corregir la causa de la omisión (Sotaquira, 2021).
3. Datos faltantes aleatorios (MAR-Missing at Random): La pérdida de información está asociada a otras variables observables o provenientes de diferentes bases de datos, pero no depende del valor faltante en sí mismo. Aunque este mecanismo introduce cierta complejidad en el análisis, puede ser abordado mediante técnicas estadísticas de imputación adecuadas (Godoy, 2022).

Al reconocer el mecanismo subyacente, es posible determinar la estrategia más apropiada para el tratamiento de datos faltantes. Sin embargo, no todas las técnicas son aplicables indistintamente e influyen en la proporción de datos faltantes (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Valoración de técnicas de acuerdo a la proporción de datos faltantes*

<b>Técnica</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Eliminación por lista	✓	-	-
Imputación simple	+/-	+/-	-
Imputación Hot-Deck	✓	+/-	-
Imputación Múltiple: MICE	✓	✓	✓

*Nota.* La tabla muestra las técnicas más conocidas para el tratamiento de datos faltantes.

En esta tabla se presentan diversas técnicas de tratamiento de datos faltantes que, dependiendo del mecanismo de ausencia y de la proporción de omisiones, pueden introducir mayor nivel de ruido o sesgo si no se seleccionan de manera adecuada. En particular, los datos MNAR no pueden ser corregidos mediante ninguno de los métodos convencionales, dado que la ausencia depende directamente del valor faltante. Por su parte, los datos MCAR, aunque teóricamente no inducen sesgo, se ven afectados cuando se aplican técnicas de eliminación, ya que estas reducen el tamaño muestral y comprometen la representatividad del análisis. Asimismo, las técnicas de imputación simple tienden a alterar la distribución original, generando estimaciones menos confiables. En contraste, los métodos más robustos, como la imputación múltiple mediante MICE (Multiple Imputation by Chained Equations) resultan preferibles, pues permiten preservar la estructura estadística de la base de datos y minimizar la introducción de sesgos (Sotaquira, 2021).

### **3. Metodología**

#### **3.1 Tipo de Investigación**

La presente investigación corresponde a un estudio de caso con un enfoque descriptivo-analítico en una empresa colombiana que abarca todo el ciclo de producción en la industria avícola, desde la reproducción de aves hasta la distribución del producto final. Este enfoque se seleccionó para abordar un problema específico en la gestión de los aceites lubricantes de su flota de vehículos, los cuales constituyen un elemento esencial dentro de su modelo de negocio integrado.

El enfoque descriptivo permite caracterizar el comportamiento de los indicadores clave de las flotas, facilitando la identificación de aquellos considerados más críticos por la organización. Por otra parte, el enfoque analítico se orienta al procesamiento e interpretación de los datos fisicoquímicos históricos de los lubricantes en conjunto con los historiales de los vehículos, lo cual permite identificar tendencias, establecer criterios de monitoreo y diseñar una herramienta predictiva que contribuya a la toma de decisiones.

#### **3.2 Recopilación de datos**

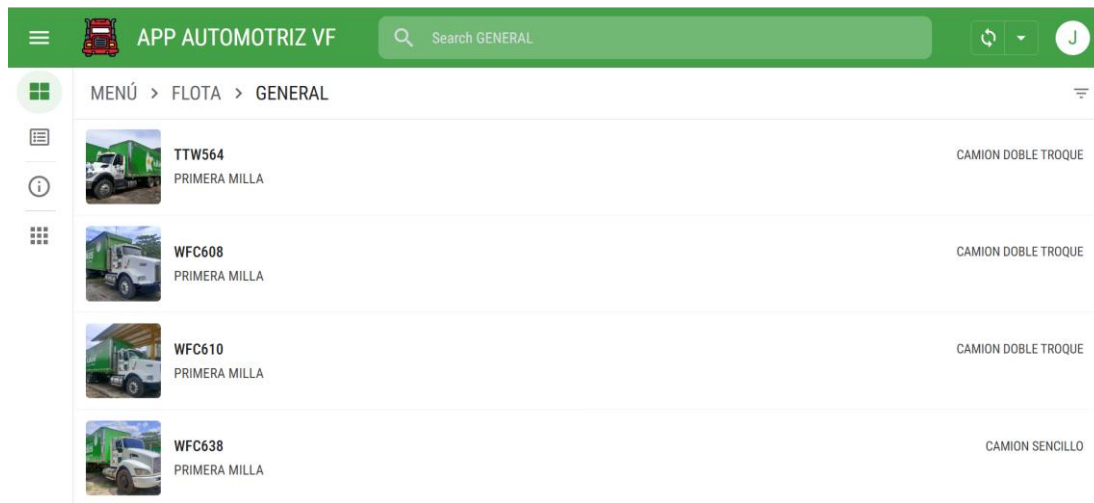
En la primera etapa se recopilaron los datos históricos de los vehículos correspondientes al periodo de inicio de la toma y análisis de muestras de aceite. El propósito fue construir una visión integral del estado operativo de las unidades y sentar las bases para los posteriores análisis. La información se consolida a partir de diversas fuentes internas de la compañía, entre ellas:

- Software de gestión Svision: Fuente principal para la extracción de los registros del historial de lecturas de cada unidad, su consumo con su respectivo folio, historial de mantenimiento correctos, preventivos y de orden mayor, así como la programación de rutinas próximas provenientes de los planes de mantenimiento de cada vehículo.

- Software de Compra Transporte y Mantenimiento (Modulo de compras): Utilizado para la obtención de datos relacionados con los costos de mantenimiento, permitiendo analizar la trazabilidad financiera de las actividades ejecutadas en el área automotriz.
- APP AUTOMOTRIZ VF: Herramienta empleada para la consulta de información general de la flota vehicular, generación de reportes por unidad e información de repuestos a partir de su codificación estandarizada.

### Figura 8

*Interfaz del aplicativo AUTOMOTRIZ VF*



*Nota.* La Figura representa la interfaz del aplicativo en la sección 'FLOTA', en donde se refleja la información general de las flotas de la compañía– Empresa avícola, 2025.

### 3.3 Selección de la flota vehicular critica

El análisis inicio con la contextualización de las flotas operativas del área automotriz, posteriormente se aplica un análisis macroeconómico para establecer un panorama general de la estructura vehicular y descartar aquellas operaciones de menor representatividad considerando su naturaleza operativa, gestión e impacto económico mediante un análisis de criticidad. Eventualmente se extrapola a las subflotas de aquellas operaciones que representan una mayor

carga presupuestal y cuya gestión técnica resulta más crítica para la continuidad del negocio, en donde finalmente se selecciona el grupo vehicular de estudio por medio del indicador costo por kilómetro.

### ***3.3.1 Contextualización de la flota seleccionada***

Una vez identificada la flota vehicular crítica, se procede a su contextualización técnica en donde se consideran variables como la antigüedad de las unidades, el modelo y configuración de los vehículos, así como los sistemas mecánicos y de postratamiento de emisiones asociados a cada unidad, esto con el fin de establecer el marco de referencia para los análisis posteriores.

### **3.4 Estudio de propiedades Físicoquímicas de los aceites lubricantes**

La empresa cuenta con un compendio de resultados analíticos, obtenidos por dos laboratorios especializados, representados por la salud del lubricante, los contaminantes presentes y la cuantificación de metales de desgaste, metales de contaminación y metales de aditivo, tal como se muestran en la Tabla 1 Cabe señalar que el análisis de cada componente se ajusta a su naturaleza y a la información disponible, lo que implica la exclusión de ciertas propiedades cuando no resultan pertinentes. De manera análoga, estas propiedades se estudiarán junto con los historiales de intervenciones para comprender su comportamiento y aportar evidencia que permita optimizar la gestión del mantenimiento.

### **3.5 Establecimiento de límites de alarma**

En esta sección se presenta, en primer lugar, el tratamiento de la base de datos correspondiente a los análisis de aceites lubricantes. Posteriormente, se describe el método aplicado para el establecimiento de límites estadísticos de alarma, fundamentado en los lineamientos de la norma ASTM D7720.

### ***3.5.1 Tratamiento en la base de datos: Aceites lubricantes***

Con el fin de garantizar la validez, consistencia y confiabilidad de la información utilizada para la posterior determinación de límites de alarma, el tratamiento de la base de datos de aceites lubricantes se desarrolló en dos fases:

1. Preprocesamiento de la base de datos: Esta fase se ejecuta en el entorno RStudio utilizando el paquete VIM (Visualization and Imputation of Missing Values) e incluye las siguientes acciones:
  - Exploración exhaustiva de la base consolidada.
  - Identificación de inconsistencias en los formatos de reportes.
  - Cuantificación de valores faltantes de la base de datos.
  - Análisis de patrones de coocurrencia de los valores faltantes.
  - Caracterización del mecanismo de ausencia de datos, con el objetivo de evaluar posibles sesgos y seleccionar el método de imputación más adecuado.
2. Modelado e imputación de datos: Esta se realiza en Python, dentro del entorno Visual Studio Code, y se desarrolla mediante los siguientes pasos:
  - Identificación de valores ausentes por componentes con el fin de determinar la magnitud de la información faltante y llevar un seguimiento de los registros imputados.
  - Selección del algoritmo y el estimador, considerando las necesidades detectadas en la etapa anterior y la relación entre las variables de la base de datos.
  - Establecimiento de criterios de convergencia y la validación de la base de datos imputada para determinar la significancia de su variación.
3. Evaluación de la significancia entre la base de datos imputada y la base original, con el fin de verificar la consistencia de la imputación y la confiabilidad de los resultados.

### **3.5.2 Aplicación de la norma ASTM-D7720**

De acuerdo con la guía estándar para la evaluación estadística de los límites de alarma (ASTM D7720), los pasos fundamentales para la creación, evaluación y ajuste de límites de alarma basados en datos de análisis de aceite en servicio y toma de decisiones son:

1. Definición de la población de equipos bajo el cumplimiento de condiciones de operación similares.
2. Recopilación de datos históricos representativos de cada parámetro de análisis para la población definida.
3. Caracterización estadística de los datos, evaluando la normalidad, la independencia y la resolución de las mediciones, siguiendo la norma ASTM D6299.
4. Selección de la técnica de análisis adecuada de acuerdo con las propiedades del conjunto de datos
5. Establecimiento de límites de alarma tentativos mediante la técnica seleccionada y validación con datos históricos para asegurar que identifiquen problemas de manera efectiva.

### **3.6 Visualización y monitoreo de las propiedades fisicoquímicas**

Para el diseño de la herramienta de seguimiento y monitoreo se establecieron los siguientes lineamientos:

- Gestión de la base de datos: se centralizó el almacenamiento de la información proveniente de los dos laboratorios en un archivo único, lo que permite mantener la trazabilidad y evitar duplicidad de registros.

- Infraestructura de visualización: se implementó un tablero interactivo conectado a la base de datos central de la empresa, el cual facilita la consulta de los datos en tiempo real y presenta los resultados de forma clara e intuitiva para el usuario final.
- Accesibilidad y compartición: la herramienta se diseñó con la capacidad de ser compartida con otros usuarios autorizados, garantizando que la información esté disponible para el personal del área de mantenimiento automotriz.
- Monitoreo automatizado: Implementación de un sistema de control basado en límites previamente definidos para cada propiedad, el cual permite generar avisos automáticos dirigidos al responsable de planeación e identificar una condición de falla.

## **4. Resultados**

### **4.1 Flotas operativas**

Desde la gestión de mantenimiento automotriz, la empresa administra cinco flotas operativas que soportan la operación en las granjas de Santander y Cauca, asegurando la continuidad y eficiencia en el ciclo productivo.

- Bionegocios: Está conformada por maquinaria pesada, entre la cual se incluyen tractores, cargadores Komatsu y Backhus (volteadoras). Su mantenimiento se ejecuta mediante equipos técnicos internos especializados, asignados estratégicamente según la ubicación geográfica de las unidades. Adicionalmente, esta flota incluye un biodigestor, una tecnología para la generación de energía a partir de la gallinaza, donde se realiza la cofermentación de excretas de ponedoras y agua residual del proceso productivo (Mancipe, 2019). Dado su nivel tecnológico, el mantenimiento de este activo se gestiona bajo un esquema de tercerización.

- Movimientos Internos: Es la flota encargada del transporte avícola interno, en la cual está compuesta por camiones para el traslado de aves y, además, cuenta con tres tractores propios. El mantenimiento de estas unidades se gestiona enteramente con recursos internos.
- Primera Milla: Conformada por vehículos encargados del transporte de huevo, su gestión de mantenimiento es compleja debido a la diversidad de activos, incluyendo tractocamiones, semirremolques, mulas-mini mulas a gas y camiones sencillos y doble troques, todos destinados al transporte de huevo comercial. Dentro de esta categoría, se gestiona una flota refrigerada destinada al huevo pasteurizado (huevo líquido).
- Avícola: Encargada del soporte logístico de la producción primaria. Sus activos son los camiones polleros, graneleros y volquetas, en donde se encargan del transporte del insumo y productos esenciales para la operación de las granjas.
- Otros: Esta categoría agrupa los vehículos de soporte para las operaciones diarias en las granjas y el traslado del personal administrativo, en donde se combinan activos propios y tercerizados.

En la siguiente tabla se ven reflejado las unidades por flota operativa:

**Tabla 3**

*Unidades por Operación*

<b>Operación</b>	<b>Cantidad</b>
Primera Milla	90
Otros	52
Movimientos Internos	30
Avícola	21
Bionegocios	12

*Nota.* Esta tabla se cuantifican las unidades presentes por operación en la compañía.

En la Tabla 2, se muestran las unidades registradas en la base de datos en el departamento de mantenimiento automotriz, que totalizan 205 unidades entre vehículos propios y tercerizados. La flota Primera Milla representa un 44% del total de las unidades de la compañía. Le siguen las flotas Otros y Movimientos Internos que en conjunto representan un 40% y las operaciones restantes constituyen la menor proporción de la taxonomía vehicular.

#### ***4.1.1 Análisis preliminar de los costos de mantenimiento por operación***

En el área automotriz, el presupuesto asignado a los costos de mantenimiento, tanto en intervenciones menores como mayores, correspondientes a las flotas operativas durante los últimos años, se presenta a continuación:

**Tabla 4**

*Costos de mantenimiento por operación*

<b>Operación</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>
Avícola	\$2,105,568,334.98	\$2,016,981,002.66	\$1,076,942,113.18
Bionegocios	\$1,195,056,164.80	\$1,950,537,885.56	\$952,313,338.13
Movimiento Internos	\$92,129,308.01	\$183,530,638.30	\$163,609,210.43
Otros	\$247,243,788.76	\$212,331,768.71	\$174,587,815.88
Primera Milla	\$5,044,104,707.61	\$4,891,595,952.91	\$2,661,546,908.01
<b>Total</b>	<b>\$8,684,102,304.16</b>	<b>\$9,254,977,248.14</b>	<b>\$5,028,999,385.61</b>

*Nota.* La tabla contiene los costos asociados por operación durante un periodo de tres años.

En la tabla 3 se observa de manera consistente los mayores costos anuales en Primera Milla durante los últimos años, consolidándose como la flota de mayor peso presupuestal dentro de la organización. Para el año 2025, se han registrado los costos requeridos por las flotas operativas hasta el mes de agosto. En este corte, la flota Avícola presenta costos en mantenimiento cerca de la mitad de lo reportado en Primera Milla aun cuando solo representa el 10.5% del total de los vehículos, siendo una desproporción significativa entre el tamaño y el presupuesto otorgado, equivalente al 25,6% del total histórico (Apéndice A)

Por otra parte, Bionegocios refleja una carga presupuestal relativamente más elevada que las flotas Otros y Movimientos Internos, a pesar de disponer de un número considerablemente menor de equipos. Esta discrepancia se encuentra asociada a la naturaleza tecnológica del biodigestor, cuya operación demanda intervenciones de carácter especializado que no pueden ser atendidas internamente. En consecuencia, toda intervención debe gestionarse de manera tercerizada.

#### 4.1.2 *Análisis de Criticidad de las flotas Operativas*

En el marco del análisis de criticidad de las flotas operativas, los criterios fueron establecidos y ajustados conforme a la relevancia operacional determinada en el área de mantenimiento automotriz. Su formulación se realizó en coordinación con el área de planeación y operación, lo cual se evidencia en la tabla siguiente.

**Tabla 5**

#### *Criterios de criticidad*

Concepto de evaluación	Factor de criticidad	Valor
Frecuencia de fallas	Se cuenta con un historial de fallas mínimas e irrelevantes.	1
	Historial de mantenimiento confiable, con pocas intervenciones correctivas; las fallas son poco frecuentes.	2
	Frecuencia de fallas promedio, sin problemas persistentes.	3
	Historial de fallas recurrentes y un elevado número de intervenciones correctivas.	4
Costos de mantenimiento	Menos de 500 millones	1
	entre 500 y mil millones	2
	entre mil y 6 mil millones	3
	Entre 10 mil y 6 mil millones	4
	Mas de 10 mil millones	5
Impacto operacional	La falla afecta únicamente funciones de soporte o administrativas, sin impacto en la operación principal.	1
	La falla no interrumpe directamente el ciclo productivo; la operación puede continuar, aunque con molestias o	2
	La falla provoca interrupciones, retrasos o sobrecostos, los cuales pueden ser gestionados sin comprometer la operación general.	3
	La falla genera costos significativos, afecta la reputación de la empresa o compromete la calidad del producto	4
	La falla paraliza operaciones críticas, interrumpe el flujo de producción o detiene el transporte de insumos o productos esenciales.	5
Flexibilidad operativa	La falla no afecta la operación, dado que existen unidades de reemplazo o la tarea puede tercerizarse sin costos importantes	1
	La interrupción es controlable mediante la reasignación de vehículos disponibles.	2
	La interrupción causa retrasos o sobrecarga de trabajo, unidades con pocas alternativas disponibles.	3
	La flota cumple funciones críticas; una falla detiene la operación o una parte vital, sin alternativas inmediatas	4

*Nota.* La tabla presenta los criterios clave del área con su concepto y puntuación.

En esta tabla se sintetiza los conceptos seleccionados con su respectiva descripción y evaluación asociada. Con base en estos criterios, se procedió a evaluar cada operación asignando una puntuación específica a cada parámetro. Esta asignación permite cuantificar la criticidad y comparar la relevancia relativa de las diferentes operaciones

**Tabla 6**

*Puntuación de parámetros en flotas operativas*

	Frecuencia de falla	Impacto en la operación	Flexibilidad Operativa	Costos de mnto
Avícola	4	5	4	4
Bionegocios	3	3	1	3
Movimiento Internos	2	2	2	2
Otros	1	1	1	2
Primera Milla	4	4	3	5

*Nota.* Esta tabla muestra la puntuación seleccionada por operación para cada criterio seleccionado.

La Tabla 4 constituye la base para el cálculo de la consecuencia asociada a cada flota y, en conjunto con la frecuencia de falla, se construye la matriz de criticidad que se muestra a continuación:

**Figura 9**

*Matriz de Criticidad*

FRECUENCIA	4				Primera Milla	Avícola
	3		Bionegocios			
	2	Movimientos Internos				
	1	Otros				
		20	40	60	80	100
CONSECUENCIA						

*Nota.* En esta figura se muestra la clasificación de criticidad de cada flota operativa en la compañía.

En la Figura 9 se observa a la flota Primera Milla y Avícola ubicadas en la zona de mayor criticidad, al combinar una alta frecuencia de falla con consecuencias potenciales críticas, lo que las clasifica como operaciones de alto riesgo dentro del área automotriz. No obstante, para la selección de la flota vehicular de estudio se opta por analizar cada una de estas.

#### **4.1.3 Análisis interno de las flotas críticas**

En esta sección se profundiza la estructura interna de las flotas previamente declaradas de alto riesgo. La operación Primera Milla está conformada por cinco subgrupos de vehículos mostrados a continuación:

**Tabla 7**

*Subflotas vehicular en Primera Milla*

<b>Subflota</b>	<b>Número de Vehículos</b>
Remolques-Semirremolques	34
Flota refrigerada	17
Tractocamión	3
Mulas	12
Camión (Doble troque -Sencillo)	24

*Nota.* Esta tabla presenta la estructura y la cantidad de vehículos que componen la operación de Primera Milla en la compañía.

En la Tabla 5, se observa que la flota está compuesta principalmente por remolques y semirremolques, los cuales representan la mayor proporción de unidades. Sin embargo, debido a su naturaleza no motriz, estos vehículos no generan gastos significativos para la empresa, ya que sus principales rubros de mantenimiento se limitan en el furgón y neumáticos. De manera similar, la flota refrigerada y las mulas a gas son completamente tercerizadas, exceptuando dos unidades (mulas), por lo que la empresa solo asume los costos relacionados con daños operativos.

En cuanto a los vehículos motrices, la compañía dispone de tres tractocamiones propios que representan el 3,2% de la flota, mientras que los camiones doble troque-sencillo constituyen

la segunda subflota de mayor proporción, cuya totalidad del mantenimiento es asumida por la empresa. En consecuencia, en esta se concentra la mayor parte del presupuesto, consolidándola como importante para el estudio.

De la misma manera, en la siguiente tabla se muestra la estructura de la operación Avícola, la cual se subdivide en cinco grupos, cada uno con una función logística específica.

**Tabla 8**

*Subflotas vehicular en Avícola*

<b>Flota Vehicular</b>	<b>Número de Vehículos</b>
Flota Operativa	1
Graneleros	13
Polleros	2
T.Galli&Lixiviados	4
Primera Milla	1

*Nota.* Esta tabla muestra las unidades por flota vehicular de la operación Avícola

En la Tabla 5 se presenta la clasificación de cada operación. En esta, se agrupa el transporte interno destinado al traslado de pollitas-Polleros, así como los vehículos asignados al acarreo de abono, identificados como T.Galli&Lixiviados, que operan mediante volquetas. Asimismo, se identifican los vehículos Graneleros, que constituyen la mayor proporción del total de la operación, en coherencia con su función y relevancia operativa dentro de la cadena de abastecimiento. Adicionalmente, se evidencia un vehículo perteneciente a Primera Milla, adaptado para el transporte de alimento en bulto, desempeñando un rol funcionalmente equivalente al de los Graneleros. Por otro lado, su funcionamiento operativo se realiza mayoritariamente con vehículos propios lo que resulta pertinente analizar la distribución de los costos de mantenimiento por subflota. A continuación, esta información se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 9**

*Costos por subflotas Avícola*

Flota Vehicular	Costos Acumulados
Graneleros	\$4,789,079,175.49
T.Galli&Lixiviados	\$757,171,815.54
Polleros	\$239,654,219.26
Flota Operativo	\$163,478,968.61
Primera Milla	\$85,144,718.26

*Nota.* Esta tabla muestra los costos acumulados en el periodo 2020-2025 de la flota vehicular.

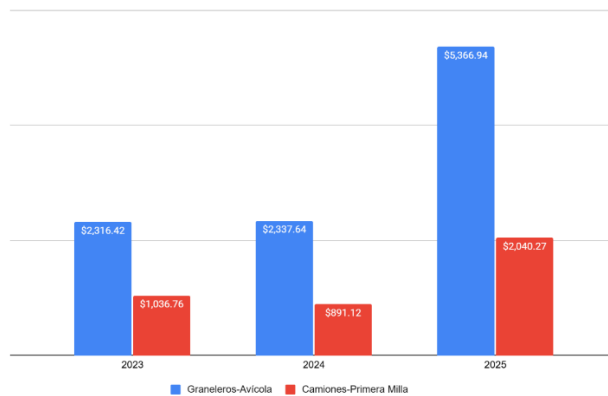
Como se observa, la subflota Graneleros representa el componente de mayor impacto económico en términos de mantenimiento, acumulando aproximadamente el 79.4% del total de costos asociados a la operación Avícola. Esta situación se ve agravada por el hecho de que dicha subflota también concentra más del 60% de las intervenciones correctivas registradas durante los últimos años (James Castillo, 2025). En consecuencia, los Graneleros constituyen un punto técnico-económico crítico dentro de la operación.

**4.1.4 Selección de la flota de estudio**

Tras identificar las subflotas críticas, se calcula el CPK anual, como se muestra en la figura.

**Figura 10**

*Costo por kilómetro de las subflotas*



*Nota.* Esta tabla muestra los costos acumulados en el periodo 2023-2025 de las subflotas críticas.

En esta figura, se evidencia que el CPK correspondiente a la subflota Avícola presenta valores sistemáticamente superiores. Por otra parte, los camiones de Primera Milla mantienen un costo inferior a \$1,100 por kilómetro hasta el 2024, alcanzando cerca de los \$2,100 en el 2025. Mientras, los Graneleros superan los \$2,300, y en la actualidad, movilizar un vehículo implica un costo aproximado de \$5,400 por kilómetro. Este comportamiento evidencia una mayor carga económica y una tendencia de crecimiento más acentuada, razón por la cual selecciona como objeto de estudio.

#### 4.2 Flota vehicular Granelera

La flota granelera, considerada un activo crítico, se desempeña bajo un régimen de uso intensivo para garantizar la distribución oportuna de alimento a cada uno de los galpones. A continuación, se presenta la información general de los vehículos disponibles en la empresa:

**Tabla 10.**

*Información general de la flota granelera*

Placas	Tipo de Vehículo	Marca	Línea	Modelo
TAW355	Doble Troque	International	7600	2012
TTW562	Camión Sencillo	International	Durastar 4300 SBA	2017
TTW666	Doble Troque	International	7600	2018
WFC639	Doble Troque	Kenworth	T-800	2015
GQU373	Doble Troque	Kenworth	T-800	2023
GQU374	Doble Troque	Kenworth	T-800	2020
TAX328	Doble Troque	International	7600	2012
XVU729	Doble Troque	International	7600	2007
XVX650	Doble Troque	International	7600	2009
TAV204	Tractomula	Kenworth	T-800	2012
WFC638	Camión Sencillo	Kenworth	T-370	2015
R-60904	Remolque	Falcon	-	2011
S-21750	Semi-Remolque	Silos y Granel	GSRE3025	2023
S-21749	Semi-Remolque	Silos y Granel	GSRE3025	2023

*Nota.* Esta tabla proporciona un panorama general de la composición mecánica de las unidades graneleras.

Como se aprecia, la flota está orientada hacia las operaciones de alto tonelaje dado que está conformada mayormente por camiones doble troque, complementando su capacidad operativa con un camión sencillo y una tractomula. A esto se suman los semirremolques y remolque, que les permiten cubrir necesidades logísticas variadas. En relación con los vehículos que integran la flota es importante destacar algunos casos particulares, entre estos el caso del GQU373 que en la actualidad no se dispone en la operación debido a hurto, por lo que no hace parte de los análisis posteriores. Por otro lado, el WFC638 en el primer trimestre del 2025 fue transferido de la operación Primera Milla a la flota Avícola, siendo reclasificado como granelero. No obstante, de acuerdo con la norma ASTM-D7720 este será excluido del análisis dado que las condiciones operativas y de carga difieren respecto al resto de la flota analizada, por lo tanto, su desempeño en términos de desgaste no resulta comparable y podría introducir sesgos en los resultados. De igual manera, los semirremolques y remolques no se consideran debido a que están diseñados para acoplarse a una quinta rueda, es decir, carecen de un tren motriz.

En relación con la antigüedad, se registran modelos entre 2007 hasta 2020. Esta diversidad indica un proceso de incorporación de unidades con mayor complejidad tecnológica directamente relacionada con la transición hacia motores de mayor eficiencia y con sistemas de control de emisiones más avanzados, en respuesta a la evolución de las normativas ambientales.

En este sentido, la Tabla 11 presenta la configuración técnica de los motores correspondientes a las unidades.

**Tabla 11.***Caracterización de los motores de la flota granelera*

Placas	Marca del Motor	Referencia del Motor	Tipo de Combustible	Configuración del Sistema de Postratamiento
TAW355	CUMMINS	ISM320	ACPM	EGR + DPF + SCR
TTW562	CUMMINS	ISB6 7E5225	ACPM	EGR + DPF + SCR
TTW666	CUMMINS	ISM 11E4345	DIESEL	EGR + DPF + SCR
WFC639	CUMMINS	ISM 350V	ACPM	EGR + DPF + SCR
GQU374	CUMMINS	ISM	DIESEL	EGR + DPF + SCR
TAX328	CUMMINS	ISM320	DIESEL	EGR + DPF + SCR
XVU729	CUMMINS	ISM	ACPM	EGR + DPF
XVX650	CUMMINS	ISM 320V	ACPM	EGR + DPF
TAV204	CUMMINS	ISX	DIESEL	EGR + DPF + SCR

*Nota.* La tabla refleja las características principales de los motores y sus sistemas de postratamiento.

La flota Granelera se encuentra predominada por motores de combustión interna Cummins con módulo de control electrónico (ECM), lo cual se denota en la nomenclatura IS. Por otra parte, la mayoría de estos vehículos cumplen con las normativas de emisiones Euro VI mediante la integración sistemas de postratamientos de gases de escape que comprende la Recirculación de Gases de Escape (EGR), un Filtro de Partículas Diésel (DPF) y un sistema de Reducción Catalítica Selectiva (SCR), permitiendo optimizar el proceso de combustión y la reducción de emisiones.

En el caso de los vehículos XVX650 y XVY729, al ser modelos más antiguos, no incorporan el sistema SCR, de manera que el control de emisiones se realiza únicamente mediante la recirculación de gases de escape (EGR) provocando una menor eficiencia y un mayor consumo de combustible debido a las limitaciones inherentes del mismo. Adicionalmente, estos modelos cumplen únicamente con normativas Euro V o anteriores debido a que para el 2010 la Agencia de Protección Ambiental (EPA) establece un límite de 0.2 g/bhp-hr (gramos por caballos de fuerza al

freno por hora) en las emisiones de NOx, lo que lleva a fabricantes de equipos originales (OEM) combinar diferentes sistemas para cumplir con las nuevas regulaciones (DieselNet, s.f.).

### **4.3 Estudio de propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes**

Ante la elevada dimensionalidad del conjunto de variables analizadas (Tabla 1), se optó por una estrategia de focalización orientada a capturar escenarios contrastantes de desgaste y envejecimiento del aceite dentro de la flota. En consecuencia, se seleccionaron cuatro vehículos: dos con régimen de operación controlado en kilómetros recorridos y dos con base en las horas de operación. En cada grupo se escogió el vehículo de mayor y menor antigüedad, de modo que la comparación permitiera contrastar el comportamiento del lubricante en condiciones distintas de servicio.

Los vehículos seleccionados son: WFC639, GQU374, XVU729 y TAX328. Previo al análisis se deben considerar las siguientes observaciones:

- En algunas unidades el registro de muestras está desde 2020 en algunas unidades hasta la actualidad, por lo que se desconoce el estado de los vehículos antes de ese año.
- No todas las unidades graneleras cuentan con historiales de mantenimiento completos desde el periodo de análisis de muestras de aceites.
- Todas las unidades de la flota cumplen actividades preventivas programadas en intervalos iguales, entre ellas cambio de aceite, cambio de filtro y toma de muestras.
- En el área de mantenimiento se realizan discusiones de resultados que, en algunos casos, han llevado a adelantar y disponer de continuas intervenciones que comprometen las frecuencias establecidas en los planes de mantenimiento.

4.3.1 Comportamiento tribológico del equipo WFC639

4.3.1.1 Motor

A continuación, se detallan las especificaciones y condiciones de operación del motor que resultan de interés para el análisis:

- Aceite de uso: MAXTER 10W-40 AVANZADO PRO API CK-4/SN Synthetic Blend.
- Intervalo de cambio de aceite: 10000 kilómetros o 2 meses.
- Intervalo de toma de muestra: 10000 kilómetros o 2 meses.
- Cambio de filtro de aceite: 10000 kilómetros o 2 meses.
- Capacidad del Carter: 42 cuartos.

En la identificación de tendencias y anomalías en la evolución del aceite, se recopila información del equipo en función de las variables clave que reflejan su comportamiento operativo. Esta información se organiza en una interfaz que permite visualizar su evolución a lo largo del tiempo. Para el motor, la presentación de los datos se muestra de la siguiente manera:

Figura 11.

Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del WFC639

Placa WFC639		Componente MOTOR		Km actual												
Nº	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehículo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TEN	TAN	Nitración	Sulfatación
1	MAXTER	12/02/2024	9.018	869.917	km.	NA	14,4	0,0	0,0	0,14	0,0	13,8	13,4	16,7	8,6	25,0
2	MAXTER	7/03/2024	997	902.264	km.	NR	17,2	5,9	0,0	1,12	0,0	15,1	8,0	18,0	0,0	26,4
3	MAXTER	20/03/2024	10.793	880.915	km.	NA	14,8	3,5	0,0	0,00	0,0	12,8	8,0	18,3	0,0	28,5
4	MAXTER	15/04/2024	11.482	892.293	km.	NA	16,4	1,6	0,0	0,00	0,0	15,9	10,4	20,3	0,0	27,8
5	MAXTER	11/09/2024	3.677	914.723	km.	NA	12,4	0,5	0,0	0,03	0,0	12,2	7,0	7,8	2,5	19,4
6	MAXTER	12/10/2024	9.957	921.003	km.	NA	15,4	3,5	0,0	0,46	0,0	11,4	7,0	17,1	0,0	24,8
7	MAXTER	26/11/2024	9.864	930.867	km.	NA	14,9	0,0	0,0	0,09	0,0	13,9	13,3	17,0	0,0	23,3
8	MAXTER	15/01/2025	12.153	942	km.	NA	15,5	1,2	0,0	0,09	0,0	19,0	5,1	20,6	20,3	28,4
9	MAXTER	19/03/2025	15.799	957.944	km.	NA	19,3	3,8	0,0	0,45	0,0	4,4	5,6	NR	10,0	35,5
10	MAXTER	18/08/2025	16.313	974.287	km.	NA	66,5	3,7	0,0	0,52	1,8	45,5	6,0	NR	0,0	30,1

Nº	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estañio	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	12/02/2024	14,9	0,8	2,3	2,8	1,8	3,0	1,0	1028,0	2,1	No aplica	No aplica	No aplica
2	7/03/2024	19,4	0,5	2,7	2,7	1,7	3,0	0,7	990,8	2,0	No aplica	No aplica	No aplica
3	20/03/2024	18,9	0,8	2,4	4,4	2,0	3,9	1,2	1043,0	2,3	No aplica	No aplica	No aplica
4	15/05/2024	14,3	0,8	2,7	3,2	1,9	2,8	0,8	872,8	2,6	No aplica	No aplica	No aplica
5	11/09/2024	5,7	0,2	1,4	3,5	0,8	0,7	0,5	1090,0	1,7	No aplica	No aplica	No aplica
6	12/10/2024	12,2	0,4	2,0	4,5	1,2	0,0	0,8	842,1	1,8	No aplica	No aplica	No aplica
7	26/11/2024	10,9	0,3	1,9	1,4	0,7	0,1	0,7	872,4	3,2	No aplica	No aplica	No aplica
8	15/01/2025	17,1	0,4	3,2	1,5	0,9	1,3	0,7	1042,0	2,6	No aplica	No aplica	No aplica
9	19/03/2025	26,9	0,5	3,1	3,2	1,7	0,1	1,0	745,0	2,7	No aplica	No aplica	No aplica
10	18/08/2025	64,5	0,6	3,3	7,8	1,6	0,0	1,8	409,2	1,0	No aplica	No aplica	No aplica

Nota. La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del motor para la unidad granelera.

En la figura se presentan distintos comportamientos del lubricante a lo largo del período de seguimiento del componente. Estos patrones reflejan condiciones de operación relevantes y se destacan mediante recuadros numerados, facilitando la identificación de los aspectos más significativos. Cada número corresponde a las observaciones que se describen a continuación:

1. El uso extendido del aceite generó síntomas de degradación, aumento de hierro hasta 64 ppm y contaminación por agua, glicol y subproductos de combustión, lo que resalta la necesidad de un monitoreo tribológico constante.
2. La viscosidad mostró una tendencia al alza por hollín y agua, comprometiendo la lubricación y aumentando el riesgo de desgaste límite, sobrecalentamiento y nitración, por lo que se recomienda un cambio oportuno de aceite.
3. La presencia de hollín, como se mencionó en el punto anterior, no solo provoca un aumento en la viscosidad, sino que también favorece la degradación del aceite, acortando su vida útil y contribuyendo a la aparición de desgaste abrasivo. Este hollín se genera principalmente por combustión incompleta, causada por una relación aire-combustible inadecuada debido a un sistema de inyección deficiente o problemas en el sistema de admisión de aire provocado por filtros saturados. Además, cuando se presenta junto con dilución de combustible, constituye un indicativo de desgaste entre las camisas y los anillos del pistón.
4. Se detectó ingreso de agua y glicol, evidenciando contaminación por refrigerante, que afecta la viscosidad, fomenta lodos, corrosión y acelerada oxidación del aceite.
5. El aumento del TAN confirmó la degradación química del aceite, potenciada por hollín, agua y glicol; esta condición, junto con mayor viscosidad, incrementa el

riesgo de desgaste corrosivo, por lo que se recomienda un cambio inmediato de lubricante.

6. La presencia de sulfatación indica la infiltración de gases de combustión al cárter, probablemente a través del desgaste o insuficiente sellado de los anillos del pistón. Estos gases, al reaccionar con agua y glicol, generan ácidos que incrementan de manera significativa el TAN y acelera la degradación química del lubricante.

#### **4.3.1.2 Diferenciales**

Los diferenciales están expuestos a frecuencias de mantenimiento y de operación estandarizadas, mostradas a continuación:

- Marca caja de velocidades: EATON FULLER
- Intervalo de cambio de aceite: 120000 kilómetros
- Cambio filtro de diferenciales: 120000 kilómetros o 15 meses
- Intervalo de toma de muestra: 60000 kilómetros o 3 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal
- Aceite de uso: Shell Spirax S2 A 85W-140

De manera análoga, la recopilación de registros de los muestreos se presenta de la siguiente manera:

**Figura12.**

*Base consolidada del diferencial frontal del WFC639*

Placa WFC639		Componente DIFERENCIAL FRONTAL				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	24/04/2023	107.574	812.850	km.		26,4			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	4,0
2	POLARIS	1/11/2023	9.717	850.733	km.		26,1			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
3	POLARIS	7/02/2024	27.361	868.377	km.		26,0			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
4	POLARIS	15/05/2024	7	892	km.		28,7			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
5	POLARIS	7/08/2024	23.564	908.524	km.		21,8			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
6	POLARIS	8/11/2024	19.808	928.221	km.		22,3			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
7	POLARIS	4/12/2024	45.907	930.867	km.		22,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
8	POLARIS	14/01/2025	57.185	942.145	km.		22,0			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
9	POLARIS	7/02/2025	2.976	945.121	km.		24,6			0,00	No aplica	2,0	No aplica	No aplica	2,0
10	POLARIS	14/05/2025	26.253	968.398	km.		24,8			0,00	No aplica	2,0	No aplica	No aplica	3,0

1

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	24/04/2023	979,0	3,0	68,0	404,0	0,0	0,0	7,0	20,0	5,0			
2	1/11/2023	49,0	13,0	3,0	22,0	0,0	0,0	0,0	5,0	3,0			
3	7/02/2024	40,0	24,0	0,0	19,0	0,0	0,0	0,0	8,0	4,0			
4	15/05/2024	153,0	0,0	4,0	30,0	0,0	0,0	1,0	7,0	3,0			
5	7/08/2024	370,0	219,0	3,0	19,0	0,0	3,0	2,0	262,0	4,0			
6	8/11/2024	482,0	272,0	0,0	20,0	0,0	4,0	2,0	217,0	3,0			
7	4/12/2024	504,0	255,0	3,0	20,0	0,0	3,0	2,0	213,0	3,0			
8	14/01/2025	794,0	374,0	6,0	27,0	0,0	6,0	4,0	261,0	3,0			
9	7/02/2025	79,0	47,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	40,0	2,0			
10	14/05/2025	50,0	9,0	3,0	36,0	0,0	0,0	0,0	19,0	2,0			

2

3

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del diferencial frontal

De acuerdo con la figura se identifican los siguientes comportamientos:

1. La primera muestra evidenció un desgaste abrasivo severo asociado a contaminación por silicio, acompañado de un elevado contenido de hierro, probablemente proveniente del engranaje principal, así como de altos niveles de aluminio atribuibles a la carcasa y presencia de cromo. Aunque la viscosidad se mantenía ligeramente elevada, los resultados indicaban signos de falla inminente del componente, lo cual se confirmó días después con la ocurrencia de una avería total que requirió una intervención mayor. Tras la reparación, se realizaron seguimientos a los 9.717 km y 27.361 km, observándose concentraciones de hierro dentro de rangos aceptables; sin embargo, en el último control se registró un incremento de cobre, acompañado de cierta proporción de silicio.
2. Tendencia creciente de desgaste, especialmente hierro y cobre, mitigada por cambios de aceite; tras el cambio en enero (2025) se observa mejora.

- Contaminación persistente por silicio por fallas de sellado o limpieza del respiradero, facilitando entrada de contaminantes externos.

En cuanto al diferencial trasero, las propiedades se comportan de la siguiente manera:

**Figura 13**

*Base consolidada del diferencial trasero del WFC639*

Placa WFC639		Componente DIFERENCIAL TRASERO				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	24/04/2023	107.674	812.850	h		23.7		0.00	No aplica	4.0	No aplica	No aplica	4.0	
2	POLARIS	1/11/2023	9.717	850.733	h		26.5		0.00	No aplica	1.0	No aplica	No aplica	1.0	
3	POLARIS	7/02/2024	27.361	868.377	km.		27.0		0.00	No aplica	4.0	No aplica	No aplica	4.0	
4	POLARIS	15/05/2024	7	892	km.		22.5		0.00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica	3.0	
5	POLARIS	7/08/2024	23.564	908.524	km.		28.5		0.00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica	4.0	
6	POLARIS	5/11/2024	19.808	928.221	km.		28.9		0.00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica	4.0	
7	POLARIS	2/12/2024	45.907	930.867	km.		29.7		0.00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica	2.0	
8	POLARIS	17/01/2025	57.185	942.148	km.		27.8		0.00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica	4.0	
9	POLARIS	7/02/2025	2.976	945.121	km.		25.2		0.00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica	4.0	
10	POLARIS	27/05/2025	26.253	968.398	km.		24.8		0.00	No aplica	2.0	No aplica	No aplica	3.0	

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estano	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	24/04/2023	271.0	128.0	8.0	119.0	0.0	4.0	1.0	93.0	4.0			
2	1/11/2023	296.0	1.0	19.0	198.0	0.0	0.0	2.0	11.0	1.0			
3	7/02/2024	195.0	1.0	19.0	78.0	0.0	1.0	1.0	5.0	4.0			
4	15/05/2024	163.0	90.0	1.0	11.0	0.0	2.0	1.0	234.0	3.0			
5	7/08/2024	210.0	2.0	8.0	91.0	0.0	0.0	1.0	8.0	3.0			
6	5/11/2024	223.0	1.0	6.0	50.0	0.0	0.0	1.0	7.0	3.0			
7	2/12/2024	229.0	0.0	7.0	51.0	0.0	0.0	1.0	8.0	3.0			
8	17/01/2025	254.0	1.0	7.0	52.0	1.0	1.0	1.0	6.0	3.0			
9	7/02/2025	75.0	0.0	1.0	14.0	0.0	0.0	0.0	172.0	3.0			
10	27/05/2025	180.0	0.0	19.0	149.0	0.0	0.0	2.0	128.0	2.0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del diferencial trasero.

A partir de esta figura, se destacan los siguientes comportamientos:

- Silicio alto (hasta 119 ppm) indica ingreso continuo de contaminantes; posible falla en retenedores o respiradero, que rompe sellos o falla en mantenimiento.
- Se registraron niveles persistentemente elevados de hierro, alcanzando hasta 296 ppm, lo que constituye un indicio de desgaste superficial por fatiga (pitting) o de desgaste adhesivo asociado a sobrecargas operacionales y a la acción abrasiva de contaminantes sólidos. Adicionalmente, la presencia simultánea de aluminio sugiere un desgaste progresivo en componentes de rodamiento, probablemente vinculado a la degradación de superficies en contacto bajo condiciones de fricción elevada.
- El aumento puntual de cobre registrado sugiere un proceso de desgaste en cojinetes o componentes antifricción. Este comportamiento probablemente está relacionado con un

régimen de lubricación deficiente relacionada al amplio periodo de servicio, intensificado por la elevada contaminación abrasiva que acelera el deterioro de las superficies en contacto.

**4.3.1.3 Transmisión**

Los lineamientos de operación y mantenimiento definidos para la transmisión se resumen a continuación:

- Intervalo de cambio de aceite: 180000 kilómetros o 24 meses
- Intervalo de toma de muestra: 120000 kilómetros o 4 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal
- Aceite de uso: Shell Spirax S4 CX 50
- La transmisión opera en ralentí al accionar el sistema hidráulico de la tolva granelera mediante un toma fuerza (PTO), lo que genera mayor carga térmica y contribuye a incrementos locales de metales de desgaste durante la operación continua.

El comportamiento registrado durante la etapa del muestreo se resume y representa en la figura siguiente:

**Figura 14.**

*Base recopilada de la transmisión del WFC639*

Placa WFC639		Componente TRANSMISIÓN				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehículo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	7/06/2023	50.564	826.464	km		16,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	2,0
2	POLARIS	12/02/2024	12.897	869.917	km		19,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
3	POLARIS	13/03/2024	22.487	879.487	km		19,3			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
4	POLARIS	9/07/2024	48.563	903.563	km		19,7			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
5	POLARIS	7/08/2024	1.099	908.524	km		19,1			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	5,0
6	POLARIS	15/10/2024	13.590	922.003	km		19,9			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
7	POLARIS	31/2/2024	22.454	930.867	km		19,3			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
8	POLARIS	10/02/2025	36.708	945.121	km		18,6			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estatio	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	7/06/2023	45,0	8,0	2,0	6,0	0,0	1,0	0,0	44,0	9,0			
2	12/02/2024	190,0	25,0	14,0	13,0	0,0	0,0	2,0	1023,0	3,0			
3	13/03/2024	181,0	29,0	12,0	86,0	2,0	0,0	1,0	998,0	3,0			
4	9/07/2024	452,0	59,0	32,0	181,0	0,0	0,0	3,0	1051,0	3,0			
5	7/08/2024	481,0	61,0	31,0	185,0	1,0	0,0	3,0	1002,0	3,0			
6	15/10/2024	376,0	20,0	15,0	86,0	0,0	1,0	2,0	919,0	4,0			
7	31/2/2024	454,0	25,0	20,0	144,0	1,0	0,0	3,0	917,0	4,0			
8	10/02/2025	485,0	33,0	28,0	178,0	0,0	2,0	3,0	947,0	4,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite de la transmisión.

En la Figura 14 se observa un incremento sostenido de Fe, Cu, Al y Si a lo largo del monitoreo, destacando una tendencia ascendente de Si que indica ingreso continuo de material abrasivo externo, probablemente por fallas en sellos o en el respiradero de la carcasa, lo que acelera el desgaste en engranajes, bujes y rodamientos; el Fe y el Al, junto con el Cu, respaldan la hipótesis de desgaste abrasivo y fatiga superficial en superficies de contacto sometidas a carga, mientras que la viscosidad permanece estable, sin dilución o degradación severa, sugiriendo que la evolución interna está dominada por contaminación sólida y que el desgaste acelerado proviene de la pérdida de efectividad de los sistemas de protección contra contaminantes externos, no de una degradación química intrínseca del aceite.

### ***4.3.2 Comportamiento tribológico del equipo GQU374***

#### **4.3.2.1 Motor**

El motor está expuesto las siguientes especificaciones y condiciones

- Aceite de uso: MAXTER 10W- 40 AVANZADO PRO API CK-4/SN Synthetic Blend.
- Intervalo de cambio de aceite y toma de muestra: 10000 kilómetros o 2 meses
- Cambio de filtro de aceite: 10000 kilómetros o 2 meses
- Capacidad del Carter: 42 cuartos

Los registros del lubricante para este equipo se muestran a continuación:

**Figura 15.**

*Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del GQU374*

Placa		Componente		Km actual												
GQU374		MOTOR														
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehículo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración	Sulfatación
1	MAXTER	12/09/2023	16.474	220.092	km.	ND	11,6	0,4	1,9	0,03	0,0	18,2	4,8	2,8	10,4	21,9
2	MAXTER	22/11/2023	12.355	243.164	km.	NA	12,4	0,5	0,6	0,05	0,0	17,3	5,8	2,9	9,8	21,0
3	MAXTER	26/12/2023	10.510	253.367	km.	NA	12,0	0,3	0,7	0,06	0,0	16,9	6,4	2,5	9,4	20,1
4	MAXTER	12/03/2024	9.742	263.006	km.	NA	12,4	0,2	1,0	0,03	0,0	17,0	6,3	2,4	7,2	21,7
5	MAXTER	30/04/2024	10.770	274.034	km.	NA	11,8	0,2	1,1	0,03	0,0	16,7	6,0	2,2	7,7	20,0
6	MAXTER	23/07/2024	8.549	282	km.	NA	12,4	0,1	0,8	0,03	0,0	15,0	6,7	1,9	5,1	19,8
7	MAXTER	11/12/2024	9.610	311.406	km.	NA	12,5	0,2	1,4	0,05	0,0	16,5	6,1	2,1	6,8	20,6
8	MAXTER	28/01/2025	9.639	321.045	km.	NA	13,3	0,2	1,4	0,02	0,0	16,0	6,3	2,2	7,1	20,9
9	MAXTER	11/03/2025	8.067	329.473	km.	NA	12,9	0,2	0,6	0,01	0,0	14,3	7,0	NR	5,9	18,9
10	MAXTER	7/05/2025	3.876	#N/A	km.	NA	13,4	0,0	0,8	0,01	0,0	14,7	7,0	NR	3,8	18,8

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO5	CODIGO ISO14
1	12/09/2023	15,2	1,5	4,2	5,1	3,1	5,6	0,5	1352,0	2,2	No aplica	No aplica	No aplica
2	22/11/2023	4,7	0,8	2,3	5,6	0,6	4,1	0,2	1350,0	2,4	No aplica	No aplica	No aplica
3	26/12/2023	3,2	0,6	1,2	3,5	1,0	3,8	0,1	1340,0	1,7	No aplica	No aplica	No aplica
4	12/03/2024	4,5	0,7	3,1	4,1	0,5	3,3	0,3	1390,0	2,4	No aplica	No aplica	No aplica
5	30/04/2024	15,8	0,9	6,5	4,3	2,0	4,1	0,9	1456,0	4,5	No aplica	No aplica	No aplica
6	23/07/2024	7,0	0,7	3,9	5,2	0,4	1,6	0,4	1350,0	2,7	No aplica	No aplica	No aplica
7	11/12/2024	4,9	0,8	3,3	1,0	0,6	2,6	0,4	1244,0	2,2	No aplica	No aplica	No aplica
8	28/01/2025	4,1	0,6	2,5	1,3	0,9	0,3	0,3	1218,0	2,2	No aplica	No aplica	No aplica
9	11/03/2025	2,9	0,4	2,9	0,4	0,9	0,0	0,4	1074,0	2,7	No aplica	No aplica	No aplica
10	7/05/2025	2,5	0,2	1,6	1,1	0,8	0,0	0,2	1197,0	2,3	No aplica	No aplica	No aplica

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del motor.

Según la Figura 15, se han presentado los siguientes comportamientos:

1. En la primera muestra se evidenció una vida útil del aceite sobre extendida junto con dilución de combustible, lo que favoreció a un incremento de oxidación y nitración, así como una reducción del TBN. Estas condiciones indican que el lubricante ha perdido parte de su capacidad de protección y eficiencia, por lo que un reemplazo oportuno contribuiría a mantener un desempeño óptimo.
2. Se ha evidenciado una reducción en la viscosidad, atribuible a la presencia de combustible. Aunque la dilución actual no es significativa, resulta conveniente revisar el sistema de combustible y considerar la realización de una videoscopia para evaluar el estado del bruñido de las camisas, con el fin de descartar el barrido del combustible al carter.

**4.3.2.2 Diferenciales**

Los diferenciales se gestionan siguiendo parámetros de operación y mantenimiento estandarizados, que se detallan a continuación:

- Marca caja de velocidades: EATON FULLER
- Intervalo de cambio de aceite: 120000 kilómetros.
- Cambio filtro de diferenciales: 120000 kilómetros o 15 meses
- Intervalo de toma de muestra: 60000 kilómetros o 3 meses.
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal.
- Aceite de uso: Shell Spirax S2 A 85W-140.

Para el equipo GQU374, se dispone de la siguiente información de muestras analizadas en el diferencial frontal:

**Figura16.**

*Evolución del comportamiento en el diferencial frontal del GQU374*

Placa GQU374		Componente DIFERENCIAL FRONTAL				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	26/01/2023	47.235	165.105	km.		24,5			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
2	POLARIS	21/03/2023	57.975	175.845	km.		25,4			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	2,0
3	POLARIS	12/09/2023	102.222	220.092	km.		25,6			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	2,0
4	POLARIS	12/09/2023	0	0	km.		25,2			0,00	No aplica	16,0	No aplica	No aplica	4,0
5	POLARIS	12/03/2024	42.914	263.006	km.		17,2			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	4,0
6	POLARIS	30/07/2024	63.542	283.634	km.		18,9			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	4,0
7	POLARIS	29/10/2024	82.926	303.020	km.		18,3			0,00	No aplica	6,0	No aplica	No aplica	4,0
8	POLARIS	30/01/2025	14.290	321.045	km.		24,5			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
9	POLARIS	15/04/2025	27.312	334.067	km.		25,1			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
10	POLARIS	30/07/2025	52	359	km.		25,6			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	26/01/2023	124,0	1,0	4,0	999,0	0,0	0,0	0,0	11,0	3,0			
2	21/03/2023	48,0	28,0	1,0	21,0	0,0	0,0	0,0	6,0	3,0			
3	12/09/2023	131,0	13,0	0,0	12,0	0,0	1,0	1,0	1,0	5,0			
4	12/09/2023	83,0	56,0	1,0	28,0	0,0	1,0	0,0	8,0	16,0			
5	12/03/2024	68,0	16,0	0,0	23,0	0,0	4,0	0,0	33,0	5,0			
6	30/07/2024	121,0	13,0	1,0	37,0	0,0	3,0	1,0	52,0	5,0			
7	29/10/2024	164,0	5,0	1,0	37,0	0,0	2,0	1,0	55,0	6,0			
8	30/01/2025	31,0	3,0	3,0	12,0	1,0	1,0	0,0	17,0	3,0			
9	15/04/2025	95,0	1,0	4,0	27,0	0,0	1,0	1,0	16,0	3,0			
10	30/07/2025	90,0	8,0	1,0	19,0	0,0	1,0	0,0	29,0	4,0			

Nota. La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del diferencial frontal.

De acuerdo a la figura se obtuvieron los siguientes hallazgos:

1. Contaminación abrasiva severa (Si 999 ppm, Fe 124 ppm) indica ingreso masivo de partículas externas por fallas en sellado/desfogue; desgaste en engranajes y superficies de apoyo, agravado por falta de monitoreo.
2. Viscosidad por debajo de SAE J306 debido a aceite en servicio 69.384 km más allá del intervalo; película lubricante adelgazada, aumentando desgaste y concentraciones de Fe y Cu. Tras renovar el ciclo de vida del lubricante, el comportamiento volvió a normales.

En cuanto al diferencial trasero, se dispone de la siguiente información de muestreo:

**Figura 17.**

*Evolución del comportamiento en el diferencial trasero del GQU374*

Placa GQU374		Componente DIFERENCIAL TRASERO				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	26/01/2023	47.235	165.105	km,		24,9			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
2	POLARIS	21/03/2023	57.975	175.845	km,		23,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	2,0
3	POLARIS	12/09/2023	102.222	220.092	km,		23,8			0,00	No aplica	17,0	No aplica	No aplica	4,0
4	POLARIS	12/03/2024	42.914	263.006	km,		17,2			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	4,0
5	POLARIS	30/07/2024	63.542	283.634	km,		18,3			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	4,0
6	POLARIS	29/10/2024	82.928	303.020	km,		18,1			0,00	No aplica	5,0	No aplica	No aplica	4,0
7	POLARIS	4/02/2025	14.290	321.045	km,		24,5			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
8	POLARIS	15/04/2025	27.312	334.067	km,		25,1			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
9	POLARIS	23/07/2025	52	359	km,		24,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	26/01/2023	123,0	1,0	3,0	33,0	0,0	1,0	0,0	12,0	3,0			
2	21/03/2023	118,0	1,0	2,0	22,0	0,0	0,0	0,0	6,0	3,0			
3	12/09/2023	160,0	1,0	5,0	34,0	0,0	0,0	1,0	6,0	17,0			
4	12/03/2024	65,0	0,0	2,0	21,0	0,0	3,0	0,0	24,0	5,0			
5	30/07/2024	125,0	1,0	5,0	44,0	0,0	2,0	1,0	41,0	5,0			
6	29/10/2024	190,0	1,0	7,0	59,0	1,0	2,0	1,0	48,0	5,0			
7	4/02/2025	64,0	0,0	4,0	20,0	0,0	1,0	0,0	13,0	3,0			
8	15/04/2025	40,0	7,0	1,0	14,0	0,0	0,0	0,0	22,0	3,0			
9	23/07/2025	129,0	1,0	2,0	33,0	1,0	1,0	1,0	102,0	3,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del diferencial trasero.

En esta figura se muestran las concentraciones de las propiedades fisicoquímicas analizadas correspondiente a la unidad granelera más reciente incorporado en la operación. En este caso, el comportamiento de las propiedades analizadas resulta en gran medida similar al observado en el diferencial frontal, con variaciones menores en los niveles de concentración. De este modo, las particularidades identificadas en el análisis del diferencial frontal pueden considerarse también

representativas para el diferencial trasero, lo que indica un patrón de comportamiento comparable en ambos componentes bajo las condiciones operativas actuales.

**4.3.2.3 Trasmisión**

Las condiciones de operación y los parámetros de mantenimiento establecidos para la transmisión son los siguientes:

- Intervalo de cambio de aceite: 180000 kilómetros o 24 meses
- Intervalo de toma de muestra: 120000 kilómetros o 4 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal
- Aceite de uso: Shell Spirax S4 CX 50
- La transmisión opera en ralentí al accionar el sistema hidráulico de la tolva granelera mediante un toma fuerza (PTO), lo que genera mayor carga térmica y contribuye a incrementos locales de metales de desgaste durante la operación continua.

La información recopilada durante el inicio del programa de muestreo en este componente se muestra en la figura siguiente:

**Figura 18.**

*Base consolidada de la transmisión del GQU374*

Placa GQU374 -		Componente TRANSMISIÓN -				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 60°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dicción de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	21/03/2023	175.045	175.045	km.		14,3		0,00	No aplica	44,0	No aplica	No aplica	5,0	
2	POLARIS	11/05/2023	189.728	189.728	km.		13,6		0,00	No aplica	43,0	No aplica	No aplica	5,0	
3	POLARIS	16/07/2023	204.765	204.765	km.		13,5		0,00	No aplica	45,0	No aplica	No aplica	6,0	
4	POLARIS	12/09/2023	16.474	220.092	km.		16,3		0,00	No aplica	37,0	No aplica	No aplica	3,0	
5	POLARIS	26/10/2023	30.994	234.612	km.		14,8		0,00	No aplica	44,0	No aplica	No aplica	4,0	
6	POLARIS	12/03/2024	68.120	263.056	km.		14,0		0,00	No aplica	44,0	No aplica	No aplica	4,0	
7	POLARIS	30/07/2024	80.021	283.639	km.		14,2		0,00	No aplica	42,0	No aplica	No aplica	4,0	
8	POLARIS	11/11/2024	100.651	304.269	km.		13,4		0,00	No aplica	43,0	No aplica	No aplica	4,0	
9	POLARIS	13/01/2025	115.033	318.651	km.		13,4		0,00	No aplica	42,0	No aplica	No aplica	4,0	
10	POLARIS	19/03/2025	125.856	329.473	km.		19,0		0,00	No aplica	2,0	No aplica	No aplica	2,0	

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estanio	Cromo	Zinc	Sodio	COBRGO ISO4	COBRGO ISO6	COBRGO ISO14
1	21/03/2023	113,0	44,0	3,0	11,0	0,0	0,0	1,0	171,0	44,0			
2	11/05/2023	106,0	66,0	3,0	12,0	1,0	1,0	1,0	226,0	43,0			
3	16/07/2023	152,0	66,0	7,0	108,0	1,0	1,0	2,0	264,0	45,0			
4	12/09/2023	20,0	9,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	67,0	37,0			
5	26/10/2023	24,0	9,0	2,0	2,0	1,0	0,0	0,0	64,0	44,0			
6	12/03/2024	32,0	12,0	1,0	4,0	2,0	1,0	1,0	64,0	44,0			
7	30/07/2024	41,0	13,0	2,0	6,0	0,0	1,0	1,0	66,0	42,0			
8	11/11/2024	35,0	12,0	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	61,0	43,0			
9	13/01/2025	44,0	14,0	1,0	3,0	1,0	1,0	1,0	67,0	42,0			
10	19/03/2025	8,0	5,0	1,0	12,0	0,0	0,0	0,0	99,0	2,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite de la transmisión.

Con base en la información mostrada en la figura, se encontraron lo siguientes hallazgos:

1. Oxidación alta constante sugiere sobrecarga mecánica o estrés térmico; falta de TAN dificulta interpretar degradación química real del lubricante.
2. Sodio alto sin glicol descarta refrigerante; indica contaminación externa por humedad ambiental.
3. Fe, Cu y Al altos en las primeras muestras apuntan a desgaste de jaulas y superficies; caída de viscosidad y alto Si en el tercer muestreo señalan ingreso de contaminantes abrasivos. Cambio de aceite redujo metales, pero la oxidación persiste.

### **4.3.3 4.3.3 Comportamiento tribológico del equipo XVU729**

#### **4.3.3.1 Motor**

El motor opera bajo las siguientes especificaciones y condiciones de servicio:

- Aceite de uso: MAXTER 10W-40 AVANZADO PRO API CK-4/SN Synthetic Blend.
- Intervalo de cambio de aceite: 500 horas
- Intervalo de toma de muestra: 250 horas
- Cambio de filtro de aceite: 500 horas
- Capacidad del Carter: 42 cuartos

La información obtenida actualmente del programa de muestreo para este vehículo se ve reflejada en la siguiente figura:

**Figura 19**

*Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del XVU729*

Placa XVU729		Componente MOTOR		Km actual		1										
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehículo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración	Sulfatación
1	POLARIS	27/10/2022	385	36.235	h		11,1	0.3	7,7	0.00	No aplica	20,0	No aplica	No aplica	8.0	No aplica
2	MAXTER	15/06/2023	570	38.074	h(s)	ND	13,8	1.3	0.0	0.02	0.0	14,9	7.3	4.8	1.0	22.1
3	MAXTER	4/01/2024	468	39.006	h	NA	12,2	1.7	0.0	0.04	0.0	15,5	6.5	6.2	6.9	21.3
4	MAXTER	4/03/2024	477	39.483	h	NA	12,1	1.7	0.0	0.06	0.0	15,2	6.8	6.0	7.4	21.0
5	MAXTER	9/04/2024	252	40.212	h	NA	12,4	0.9	0.0	0.03	0.0	15,3	6.7	3.8	4.5	18.7
6	POLARIS	17/12/2024	168	40.604	h		12,8	0.3	1,6	0.00	No aplica	10,0	No aplica	No aplica	5.0	No aplica
7	POLARIS	29/01/2025	405	40.841	h		12,9	0.8	1,8	0.00	No aplica	11,0	No aplica	No aplica	6.0	No aplica
8	MAXTER	18/03/2025	194	41.035	h	NA	13,1	0.6	0.0	0.02	0.0	12,2	7.7	NR	2.7	18.3
9	MAXTER	20/05/2025	300	41.141	h	NA	13,1	0.4	0.0	0.02	0.0	12,8	7.1	NR	4.1	19.8

2		Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	27/10/2022	12.0	11.0	0.0	3.0	6.0	1.0	0.0	1224.0	20.0			
2	15/06/2023	11.4	1.3	2.9	3.2	2.1	2.7	0.4	1262.0	2.2	No aplica	No aplica	No aplica
3	4/01/2024	11.1	1.0	3.1	6.8	0.7	5.0	0.7	1232.0	3.4	No aplica	No aplica	No aplica
4	4/03/2024	9.7	0.8	1.9	4.8	0.8	4.7	0.7	1334.0	2.3	No aplica	No aplica	No aplica
5	9/04/2024	8.2	0.3	2.7	4.4	0.6	1.6	0.8	1239.0	2.4	No aplica	No aplica	No aplica
6	17/12/2024	8.0	0.0	1.0	6.0	0.0	0.0	0.0	1164.0	10.0			
7	29/01/2025	13.0	1.0	3.0	6.0	1.0	0.0	0.0	1215.0	11.0			
8	18/03/2025	4.2	0.2	1.9	0.6	0.8	0.0	0.3	977.2	2.3	No aplica	No aplica	No aplica
9	20/05/2025	8.1	0.4	2.1	0.8	1.1	0.2	0.6	1154.0	2.8	No aplica	No aplica	No aplica

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite del motor.

En concordancia a la Figura 19, se destacaron los siguientes comportamientos para este equipo:

1. Se presentaron omisiones en la medición del TBN en algunas muestras; sin embargo, las determinaciones previas y posteriores a dichas omisiones no mostraron caídas superiores al 50 % de su valor inicial ni incrementos relevantes de oxidación, nitración o sulfatación, lo cual indica que el aceite no presentó una degradación crítica, incluso después de haberse extendido hasta 570 horas en la segunda muestra.
2. En diciembre de 2024 se detectó alta dilución de combustible y sodio, pero sin afectar la viscosidad ni generar desgaste anormal. Tras un remuestreo en enero de 2025 se confirmó la tendencia y se realizó el cambio de aceite, considerándose un evento puntual, ya que no volvió a repetirse.
3. La viscosidad del lubricante se mantuvo dentro de un rango aceptable, con variaciones aproximadas de  $\pm 4$  cSt durante todo el historial del equipo.

- 4. El motor, sin registros de overhaul, mantuvo bajos niveles de hollín, lo que evidencia buena combustión, ausencia de fallas en aire o combustible y un correcto sellado, confirmando su buen estado operativo a pesar de la antigüedad.

**4.3.3.2 Diferenciales**

Los parámetros de mantenimiento y operación de los diferenciales:

- Marca caja de velocidades: EATON FULLER
- Intervalo de cambio de aceite: 2000 horas o 15 meses
- Intervalo de toma de muestra: 1500 horas o 3 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal
- Aceite de uso: Shell Spirax S2 A 85W-140

El diferencial frontal la base de datos está expuesta en la siguiente figura:

**Figura20.**

*Evolución del comportamiento del lubricante en el diferencial frontal del XVU729*

Placa XVU729      Componente DIFERENCIAL FRONTAL      2      Km actual      4      1

N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN
1	POLARIS	27/10/2022	2.622	36.235	h		25.9			0,00	No aplica	7.0	No aplica	No aplica
2	POLARIS	11/05/2023	1.029	37.849	h		23.3			0,00	No aplica	4.0	No aplica	No aplica
3	POLARIS	15/06/2023	1.302	38.122	h		22.9			0,00	No aplica	4.0	No aplica	No aplica
4	POLARIS	27/03/2024	23.641	62.179	h		25.5			0,00	No aplica	2.0	No aplica	No aplica
5	POLARIS	4/09/2024	729	40.212	h		27.8			0,00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica
6	POLARIS	16/12/2024	1.121	40.604	h		29.6			0,00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica
7	POLARIS	25/02/2025	1.500	40.983	h		26.9			0,00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica
8	POLARIS	21/08/2025	2.058	8.260	h		28.2			0,00	No aplica	3.0	No aplica	No aplica

5      3      6

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	27/10/2022	206.0	21.0	6.0	25.0	0.0	1.0	1.0	13.0	7.0			
2	11/05/2023	53.0	6.0	2.0	5.0	1.0	4.0	0.0	21.0	4.0			
3	15/06/2023	57.0	7.0	2.0	5.0	0.0	3.0	0.0	22.0	4.0			
4	27/03/2024	68.0	7.0	3.0	8.0	1.0	1.0	0.0	13.0	2.0			
5	4/09/2024	20.0	8.0	2.0	8.0	0.0	0.0	0.0	20.0	3.0			
6	16/12/2024	30.0	9.0	1.0	8.0	1.0	0.0	0.0	21.0	3.0			
7	25/02/2025	40.0	12.0	0.0	9.0	1.0	0.0	0.0	16.0	3.0			
8	21/08/2025	59.0	16.0	1.0	10.0	0.0	0.0	0.0	20.0	3.0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite en el diferencial frontal.

1. No se evidenció degradación por oxidación, incluso con intervalos de operación extendidos, lo que confirma la estabilidad del lubricante bajo altas temperaturas y antigüedad.
2. La viscosidad se mantuvo estable y dentro de los rangos de la norma SAE J306, aun después de más de 2000 horas de servicio.
3. Las muestras presentaron concentraciones de metales de desgaste por debajo de 70 ppm, con excepción de la primera, que presentó un pico de hierro y otros metales asociado a desgaste abrasivo, el resto mostró concentraciones metálicas bajas y estables tras el cambio de lubricante, descartando deterioro progresivo en el diferencial.
4. No se detectó presencia de agua, lo que confirma el buen funcionamiento de sellos y respiraderos; las concentraciones de silicio se atribuyen a la naturaleza de las muestras.
5. La muestra N.º 4 reportó 26.000 horas de servicio, pero se considera un error de registro, siendo lo más probable poco más de 2000 horas reales

En cuanto al diferencial trasero, los datos recopilados de los análisis de las muestras de aceite se reflejan a continuación:

**Figura21.**

*Evolución del comportamiento del lubricante en el diferencial trasero del XVU729*

Placa XVU729		Componente DIFERENCIAL TRASERO				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hulín	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	
1	POLARIS	27/10/2022	2.622	36.235	h		25,4			0,00	No aplica	0,0	No aplica	No aplica	
2	POLARIS	11/05/2023	1.829	37.849	h		25,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	
3	POLARIS	15/06/2023	1.302	38.122	h		25,1			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	
4	POLARIS	27/03/2024	23.041	62.179	h		26,4			0,00	No aplica	2,5	No aplica	No aplica	
5	POLARIS	4/09/2024	729	40.212	h		27,8			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	
6	POLARIS	10/12/2024	1.121	40.004	h		25,9			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	
7	POLARIS	22/02/2025	1.500	40.983	h		25,1			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	
8	POLARIS	13/08/2025	2.058	8.260	h		27,9			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estano	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	27/10/2022	56,0	1,0	3,0	18,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0			
2	11/05/2023	31,0	0,0	2,0	5,0	0,0	5,0	0,0	28,0	3,0			
3	15/06/2023	40,0	1,0	4,0	6,0	0,0	5,0	0,0	26,0	3,0			
4	27/03/2024	66,0	1,0	2,0	16,0	1,0	1,0	1,0	14,0	2,0			
5	4/09/2024	26,0	1,0	2,0	11,0	0,0	0,0	0,0	23,0	3,0			
6	16/12/2024	35,0	0,0	1,0	17,0	1,0	0,0	0,0	24,0	3,0			
7	22/02/2025	38,0	0,0	0,0	15,0	2,0	0,0	0,0	24,0	3,0			
8	13/08/2025	53,0	1,0	1,0	15,0	0,0	0,0	0,0	29,0	3,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite en el diferencial frontal.

1. El historial de muestreo presentó parámetros de desgaste controlados, con concentraciones de metales dentro de rangos aceptables, aun considerando la presencia de silicio en la muestra del 27/10/2022, que registró la mayor concentración en su historial. Esto indica que, a pesar de la entrada de partículas abrasivas, no se generó un mecanismo de deterioro progresivo en los componentes internos.
2. La viscosidad del lubricante se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la especificación SAE J306, sin verse afectada por fenómenos de alta oxidación, concentraciones elevadas de metales de desgaste o contaminación, lo que indica un desempeño estable del aceite en condiciones de operación normales.
3. Durante la toma simultánea de muestras en los dos diferenciales, se generó un error sistemático en la ejecución del servicio del lubricante en la muestra número 4, lo que afecta la trazabilidad de los registros de esa operación.

#### **4.3.3.3 Transmisión**

Los parámetros de mantenimiento y operación para la transmisión son los siguientes:

- Intervalo de cambio de aceite: 3000 horas o 24 meses
- Intervalo de toma de muestra: 3000 horas o 4 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal
- Aceite de uso: Shell Spirax S4 CX 50
- La transmisión opera en ralentí al accionar el sistema hidráulico de la tolva granelera mediante un toma fuerza (PTO), lo que genera mayor carga térmica y contribuye a incrementos locales de metales de desgaste durante la operación continua.

**Figura22.**

*Evolución del comportamiento del lubricante en la transmisión del XVU729*

Placa XVU729		Componente TRANSMISIÓN		1		Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	13/12/2021	625	970	h		12,1			0,00	No aplica	11,0	No aplica	No aplica	4,0
2	POLARIS	16/03/2023	3.598	37.504	h		14,1			0,00	No aplica	17,0	No aplica	No aplica	3,0
3	POLARIS	15/06/2023	1.302	38.122	h		15,6			0,00	No aplica	18,0	No aplica	No aplica	3,0
4	POLARIS	27/03/2024	23.641	62.179	h		15,4			0,00	No aplica	40,0	No aplica	No aplica	3,0
5	POLARIS	20/06/2024	1.272	1.272	h		15,4			0,00	No aplica	39,0	No aplica	No aplica	4,0
6	POLARIS	31/01/2025	772	40.868	h		16,8			0,00	No aplica	13,0	No aplica	No aplica	6,0
7	POLARIS	19/06/2025	1.309	41.405	h		16,7			0,00	No aplica	13,0	No aplica	No aplica	6,0

3		2											
N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	13/12/2021	11,0	4,0	1,0	6,0	0,0	0,0	0,0	1029,0	11,0			
2	16/03/2023	102,0	7,0	8,0	37,0	0,0	0,0	0,0	37,0	17,0			
3	15/06/2023	116,0	7,0	24,0	84,0	0,0	0,0	1,0	52,0	18,0			
4	27/03/2024	172,0	16,0	9,0	47,0	1,0	0,0	2,0	138,0	40,0			
5	20/06/2024	179,0	16,0	13,0	52,0	1,0	0,0	1,0	141,0	39,0			
6	31/01/2025	66,0	130,0	5,0	22,0	0,0	0,0	0,0	976,0	13,0			
7	19/06/2025	83,0	273,0	8,0	21,0	2,0	0,0	0,0	921,0	13,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite en la transmisión.

Los hallazgos encontrados en el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas son los siguientes:

1. La primera muestra se tomó con un ciclo de servicio relativamente bajo. La viscosidad se registró en 6,9 cSt, por debajo del valor de referencia de la ficha técnica (LUBRICANTES, 2025), sin presencia de agua, mientras que el sodio se encontró en la concentración más baja de su historial. No se detectaron altas concentraciones de metales de desgaste. A pesar de ello, se realizó una renovación del lubricante mediante un cambio de aceite, asegurando el inicio de un ciclo de operación controlado.
2. El vehículo presentó fallas en el sistema de sellado o desfogue, lo que ha permitido la entrada de partículas externas y la presencia de concentraciones elevadas de silicio a lo largo de casi todo su historial.
3. Entre el muestreo del 16/03/2023 y el 20/06/2024, la transmisión presentó una tendencia de desgaste abrasivo. Se registraron concentraciones elevadas de hierro,

inicialmente acompañadas de un incremento en aluminio, seguido posteriormente por concentraciones elevadas de cobre. Este comportamiento se asocia al desgaste de componentes internos como sincronizadoras, bujes y engranajes durante la operación. Durante este periodo solo se registraron dos cambios de aceite, realizados debido a los niveles de oxidación observados entre las muestras 3 y 4. Tras el segundo cambio de aceite, se observó una disminución de hierro (31/05/2025), aunque las concentraciones de cobre y silicio permanecieron elevadas, mientras que los índices de oxidación se mantuvieron bajos.

#### **4.3.4 4.3.4 Comportamiento tribológico del equipo TAX328**

##### **4.3.4.1 Motor**

El motor está expuesto las siguientes especificaciones y condiciones de operación:

- Aceite de uso: MAXTER 10W-40 AVANZADO PRO API CK-4/SN Synthetic Blend.
- Intervalo de cambio de aceite: 500 horas.
- Intervalo de toma de muestra: 250 horas o cada 2 meses.
- Cambio de filtro de aceite: 500 horas o cada 2 meses.
- Capacidad del Carter: 42 cuartos.

La base de datos consolidada de los registros de los análisis de las propiedades fisicoquímicas se refleja de la siguiente manera, integrando los resultados de las muestras recolectadas y organizados por vehículo, componente y fecha de muestreo.

Figura 23.

Evolución del comportamiento del lubricante en el motor del TAX328

Placa TAX328		Componente MOTOR		Km actual												
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración	Sulfatación
1	MAXTER	16/05/2024	273	28.904	h	NA	17,2	2.1	0.0	0.05	0.0	13.5	7.2	6.9	4.1	21.2
2	MAXTER	19/06/2024	440	29.071	h	NA	13.0	1.8	0.0	0.05	0.0	14.9	6.9	6.4	4.5	21.7
3	MAXTER	6/08/2024	360	29.516	h	NA	14.5	0.7	0.0	0.00	0.0	14.5	6.1	12,0	4.2	19.8
4	MAXTER	20/09/2024	329	29.899	h	NA	13.6	1.8	0.0	0.02	0.0	15.6	6.4	7.8	3.3	22.6
5	MAXTER	15/10/2024	504	30.074	h	NA	14.0	3,7	0.0	0.05	0.0	16.3	5.5	11,2	4.4	24,6
6	POLARIS	13/11/2024	193	7.779	h	NA	13.5	1.1	<2	0.00	No aplica	10.0	No aplica	No aplica	6.0	No aplica
7	MAXTER	9/12/2024	237	30.311	h	NA	14.1	3,6	0.0	0.07	0.0	14.5	6.1	10,8	3.9	23,0
8	MAXTER	20/02/2025	469	30.897	h	NA	16.4	4,0	0.0	0.00	0.0	19,1	7.7	18,4	4.6	25,9
9	MAXTER	27/03/2025	272	31.163	h	NA	16.1	5,3	0.0	0.00	0.0	15.8	5.9	NR	0.0	26,9
10	POLARIS	30/07/2025	481	31.828	h	NA	14.7	2,1	<2	0.00	No aplica	13.0	No aplica	No aplica	8.0	No aplica

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO5	CODIGO ISO14
1	16/05/2024	12.2	0.5	3.2	5.3	0.0	3.0	1.0	1154.0	2.2	No aplica	No aplica	No aplica
2	19/06/2024	15.0	0.3	3.4	12.2	0.3	3.9	1.2	1356.0	2.1	No aplica	No aplica	No aplica
3	6/08/2024	20.1	0.6	4.7	8.3	0.0	1.6	2.2	1145.0	2.7	No aplica	No aplica	No aplica
4	20/09/2024	20.8	0.4	3.7	4.5	0.6	0.0	2.0	1185.0	2.8	No aplica	No aplica	No aplica
5	15/10/2024	28.1	0.5	3.8	4.4	0.5	0.0	2.3	1049.0	2.9	No aplica	No aplica	No aplica
6	13/11/2024	17.0	1.0	3.0	6.0	0.0	1.0	1.0	1102.0	10.0			
7	9/12/2024	20.6	0.6	2.8	8.7	0.4	1.9	1.9	1013.0	2.2	No aplica	No aplica	No aplica
8	20/02/2025	64.5	2.5	12.6	24.8	1.6	0.8	4.6	813.1	3.8	No aplica	No aplica	No aplica
9	27/03/2025	45.2	1.8	5.7	11.8	1.9	0.0	1.4	711.1	6.5	No aplica	No aplica	No aplica
10	30/07/2025	28.0	1.0	3.0	5.0	0.0	0.0	2.0	1107.0	13.0			

Nota. La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite en motor.

A continuación, se detallan los patrones de comportamiento más relevantes:

1. Se evidenció persistentes problemas de combustión provocando ligeros incrementos de viscosidad, aunque dentro de los márgenes operativos permitidos. Dicho comportamiento se correlaciona principalmente con la recirculación de gases a través del sistema EGR, generando una mayor carga de subproductos ácidos. Mas no, con indicios de desgaste severo en anillos o camisas, lo cual se sustenta en la ausencia de dilución significativa de combustible. Asimismo, se considera como un posible mecanismo la transferencia de contaminantes por arrastre desde el turbocompresor hacia el circuito de lubricación, lo que explicaría la persistencia de estos compuestos en el aceite usado.
2. Se registraron concentraciones elevadas de sulfatación en todas las muestras, lo que sugiere un aporte significativo de compuestos derivados del azufre provenientes del

combustible. Esta condición incrementa la carga química sobre el lubricante, forzando su reserva alcalina y favoreciendo la generación de acidez, lo que contribuye al deterioro de sus propiedades protectoras y acelera los procesos de desgaste.

3. Tres muestras reportaron valores anómalos de TBN superiores al aceite nuevo, atribuibles a error de laboratorio o cruce de lubricantes, agravado por la falta de registros de nivelación.
4. En diversas muestras se mantiene un TBN superior al 50% del valor del lubricante nuevo. No obstante, en ellas se registran incrementos significativos hasta superiores de TAN, acompañados de un proceso persistente de oxidación, lo que refleja una degradación química avanzada del aceite
5. El historial evidenció aumento progresivo de hierro y deterioro del aceite, con excepción de una muestra puntual. Tras 237 horas adicionales de operación se incrementaron acidez, hollín y desgaste, llegando finalmente a la mayor concentración de hierro, silicio y cromo, indicadores de daño en anillos y pistones.

#### **4.3.4.2 Diferenciales**

Parámetros de mantenimiento y operación de los diferenciales:

- Marca caja de velocidades: EATON FULLER
- Intervalo de cambio de aceite: 2000 horas o 15 meses
- Intervalo de toma de muestra: 1500 horas o 3 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal
- Aceite de uso: Shell Spirax S2 A 85W-140

**Figura 24.**

*Base consolidada del diferencial frontal en el equipo TAX328*

Placa TAX328		Componente DIFERENCIAL FRONTAL				Km actual									
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	27/01/2023	1.819	26.636	h		25.8			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
2	POLARIS	9/02/2023	246	26.882	h		25.3			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	2,0
3	POLARIS	30/06/2023	273	27.449	h		27.7			0,00	No aplica	2,0	No aplica	No aplica	2,0
4	POLARIS	19/03/2024	1.394	6.082	h		26.7			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	2,0
5	POLARIS	9/04/2024	1.506	28.682	h		25.7			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
6	POLARIS	10/07/2024	636	29.384	h		27.7			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
7	POLARIS	16/10/2024	1.326	30.074	h		28.8			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0
8	POLARIS	7/04/2025	2.431	31.179	h		27.7			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
9	POLARIS	22/07/2025	644	31.828	h		21,8			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	3,0

N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaño	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	27/01/2023	228,0	17,0	16,0	69,0	0,0	0,0	2,0	15,0	3,0			
2	9/02/2023	296,0	22,0	17,0	87,0	0,0	1,0	2,0	16,0	3,0			
3	30/06/2023	55,0	3,0	3,0	18,0	0,0	2,0	0,0	11,0	2,0			
4	19/03/2024	59,0	6,0	3,0	20,0	1,0	0,0	0,0	15,0	3,0			
5	9/04/2024	80,0	8,0	3,0	23,0	1,0	0,0	0,0	17,0	4,0			
6	10/07/2024	38,0	56,0	2,0	14,0	0,0	1,0	0,0	24,0	3,0			
7	16/10/2024	59,0	117,0	0,0	20,0	0,0	1,0	0,0	29,0	3,0			
8	7/04/2025	93,0	81,0	0,0	21,0	0,0	1,0	0,0	40,0	4,0			
9	22/07/2025	72,0	14,0	0,0	10,0	0,0	1,0	1,0	35,0	3,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite en el diferencial.

A continuación, se describen los patrones de interés más destacados:

1. Las primeras muestras mostraron contaminación abrasiva por silicio y hierro elevado, atribuida a fallas en el sellado, aunque el lubricante mantenía estabilidad fisicoquímica.
2. Entre junio de 2023 y abril de 2024 se evidenció un aumento progresivo de hierro, silicio y viscosidad, lo que intensificó el desgaste. En julio de 2024 el hierro disminuyó, pero el cobre alcanzó su máximo histórico, indicando desgaste en componentes de bronce. Esta condición persistió hasta abril de 2025, cuando se registró nuevamente un incremento de la viscosidad y se decidió realizar el cambio de aceite para mitigar el desgaste.

Para el diferencial trasero se tiene la siguiente base de datos de muestras recopiladas:

**Figura 25.**

*Base consolidada del diferencial trasero del TAX328*

Placa TAX328		Componente DIFERENCIAL TRASERO				1		Km actual							
N°	Laboratorio	Fecha toma	Vida muestra	Km vehiculo	Unidad	Viscosidad 40°C	Viscosidad 100°C	Hollin	% Dilución de combustible	% Agua	Glicol	Oxidación	TBN	TAN	Nitración
1	POLARIS	27/01/2023	1.819	26.636	h		WAT			0,40	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	8,0
2	POLARIS	9/03/2023	246	26.882	h		WAT			0,40	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	2,0
3	POLARIS	30/06/2023	0	0	unk					0,00	No aplica	2,0	No aplica	No aplica	2,0
4	POLARIS	19/03/2024	1.394	6.082	h		14,5			0,00	No aplica	7,0	No aplica	No aplica	2,0
5	POLARIS	9/04/2024	1.506	28.682	h		25,8			0,00	No aplica	4,0	No aplica	No aplica	4,0
6	POLARIS	10/07/2024	636	29.384	h		28,7			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
7	POLARIS	16/10/2024	1.326	30.074	h		28,6			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
8	POLARIS	9/04/2025	2.431	31.179	h		27,8			0,00	No aplica	3,0	No aplica	No aplica	4,0
9	POLARIS	28/07/2025	644	31.828	h		21,4			0,00	No aplica	2,0	No aplica	No aplica	3,0

2		3											
N°	Fecha toma	Hierro	Cobre	Aluminio	Silicio	Plomo	Estaoio	Cromo	Zinc	Sodio	CODIGO ISO4	CODIGO ISO6	CODIGO ISO14
1	27/01/2023	152,0	1,0	12,0	54,0	0,0	1,0	1,0	12,0	4,0			
2	9/03/2023	322,0	2,0	24,0	108,0	0,0	0,0	3,0	14,0	3,0			
3	30/06/2023	80,0	1,0	4,0	27,0	0,0	1,0	0,0	12,0	2,0			
4	19/03/2024	177,0	1,0	7,0	43,0	0,0	0,0	1,0	18,0	7,0			
5	9/04/2024	234,0	1,0	8,0	51,0	1,0	0,0	1,0	21,0	4,0			
6	10/07/2024	115,0	1,0	4,0	24,0	0,0	0,0	1,0	15,0	3,0			
7	16/10/2024	208,0	0,0	7,0	38,0	1,0	1,0	1,0	16,0	3,0			
8	9/04/2025	122,0	1,0	2,0	24,0	0,0	0,0	1,0	48,0	3,0			
9	28/07/2025	78,0	0,0	1,0	11,0	0,0	1,0	1,0	16,0	2,0			

*Nota.* La figura refleja la información relevante del diferencial

Con respecto a la figura, se destacan los siguientes aspectos:

1. Las dos primeras muestras fueron descartadas por contaminación, lo que impidió medir con precisión la viscosidad y evaluar el estado real del lubricante.
2. Entre marzo y octubre de 2024 se evidenció desgaste abrasivo crónico por ingreso de partículas externas, asociado a fallas en sellos o ventilación. El cambio de aceite no solucionó la causa raíz, y la variación de viscosidad reflejó efectos de cizallamiento y degradación térmica inducidos por la abrasión.
3. La última muestra mostró una disminución inusual de la viscosidad y presencia de hierro, lo que indica que el sistema no logró estabilizarse tras la intervención.

**4.3.4.3 Transmisión**

Los intervalos y condiciones de operación para la transmisión se presentan a continuación:

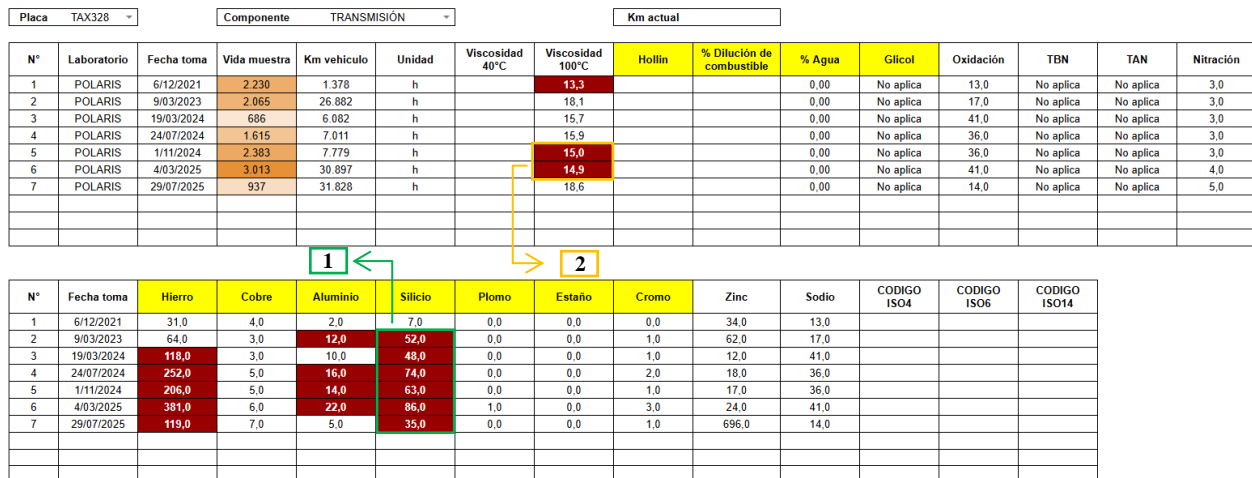
- Intervalo de cambio de aceite: 3000 horas o 24 meses
- Intervalo de toma de muestra: 3000 horas o 4 meses
- Inspección del respiradero de desfogue: Semanal

- Aceite de uso: Shell Spirax S4 CX 50
- La transmisión opera en ralentí al accionar el sistema hidráulico de la tolva granelera mediante un toma fuerza (PTO), lo que genera mayor carga térmica y contribuye a incrementos locales de metales de desgaste durante la operación continua

El comportamiento de las propiedades fisicoquímicas de los análisis de las muestras recopiladas se muestra a continuación:

**Figura 26.**

*Evolución del comportamiento del lubricante en la transmisión del TAX328*



*Nota.* La figura refleja la información relevante de los análisis del aceite en la transmisión.

Con respecto a la figura, se destacan los siguientes aspectos:

1. Se han registrado altas concentraciones de partículas abrasivas externas (silicio) desde la muestra del 9/03/2023 hasta la actualidad, posiblemente asociadas a fallas en los sellos o a la obstrucción del respiradero. Estas condiciones favorecen el desgaste de superficies metálicas internas, como engranajes y rodamientos, reflejado en la creciente concentración de metales de desgaste.

2. El lubricante ha sido sometido a una extensión excesiva de su período de servicio, lo que ha contribuido a su degradación mediante el adelgazamiento de la viscosidad y ha favorecido la aparición de metales de desgaste.

#### 4.4 Establecimiento de límites de alarma

Para el establecimiento de límites de alarma, en concordancia con los lineamientos de la norma ASTM D7720, se contó con una base de 343 muestras de aceite usado recolectadas entre el periodo 2022–2025. Estos registros provienen de componentes del tren motriz pertenecientes a distintas unidades operativas de la flota granelera. La distribución de las muestras se presenta a continuación:

**Tabla 12.**

*Cantidad de muestras por componente*

Componente	Numero de Muestras
Diferencial	7
Diferencial Frontal	68
Diferencial Trasero	68
Motor	127
Transmisión	73

*Nota.* Esta tabla evidencia las muestras recopiladas por tres años en la compañía en toda la flota.

En la Tabla 10 se observa que el motor concentra la mayor proporción de muestras analizadas, lo cual obedece a la multiplicidad de procesos de degradación y contaminación a los que se encuentra expuesto el lubricante en este componente. Por su parte, los diferenciales trasero y frontal registran un número equivalente de muestras, reflejo de la estandarización en los intervalos y procedimientos de muestreo definidos en sus planes de mantenimiento. Adicionalmente, se dispone de un reducido conjunto de registros clasificados como Diferencial, correspondientes a un vehículo sencillo. No obstante, este subconjunto no cumple con el umbral

mínimo de 50 muestras requerido para emplear un análisis independiente (ASTM INTERNATIONAL, 2017). Por lo tanto, para preservar la totalidad de la información disponible se optó por reclasificar estas muestras como pertenecientes a un diferencial trasero. Esta decisión se fundamenta en que ambos sistemas operan bajo condiciones mecánicas y de carga comparables, a diferencia del diferencial delantero, el cual incorpora un divisor de potencia que induce un régimen de mayor carga y, en consecuencia, un comportamiento tribológico distinto.

#### 4.4.1 Tratamiento de la base de datos

##### 4.4.1.2 Preprocesamiento de datos

Como etapa inicial se identifica de la estructura general del conjunto, especificando su dimensión y el tipo de datos asociados a cada variable. Esta exploración se desarrolló en el entorno de programación R, la cual permitió validar la coherencia en la tipificación de las variables y garantizar una base sólida para los análisis posteriores. A continuación, se presenta los resultados correspondientes:

#### Figura 27

##### Caracterización preliminar de las data

```
'data.frame': 343 obs. of 30 variables:
 $ LABORATIO      : chr
 $ CODIGO         : chr
 $ TIPO.DE.FLOTA  : chr
 $ PLACA         : chr
 $ MUESTRA       : chr
 $ COMPONENTE    : chr
 $ FECHA...TOMA   : POSIXct, format:
 $ FECHA.DE.RECEPCIÓN : POSIXct, format:
 $ HOLLIN        : num
 $ HIERRO.Fe     : num
 $ COBRE.Cu      : num
 $ PLOMO.Pb     : num
 $ ALUMINIO.AL   : num
 $ CROMO.Cr      : num
 $ ESTAÑO.Sn     : num
 $ ZINC.Zn       : num
 $ SILICIO.Si    : num
 $ VISCOSIDAD    : num
 $ KM.MUESTRA    : num
 $ SODIO.Na      : num
 $ OXIDACIÓN     : num
 $ DILUCIÓN.DE.COMBUSTIBLE : num
 $ X...Agua      : num
 $ KM.VEHICULO   : num
 $ UNDA         : chr
 $ TAN          : num
 $ TBN          : num
 $ NITRACIÓN     : num
 $ SULFATACIÓN  : num
 $ GLICOL       : num
```

*Nota.* Esta figura se evidencia el procesamiento de la base de datos en Rstudio y su clasificación.

En la Figura 2 se evidencia una correcta importación e identificación de las variables según su tipo, lo cual resulta fundamental ya que garantiza la coherencia estructural del conjunto de datos

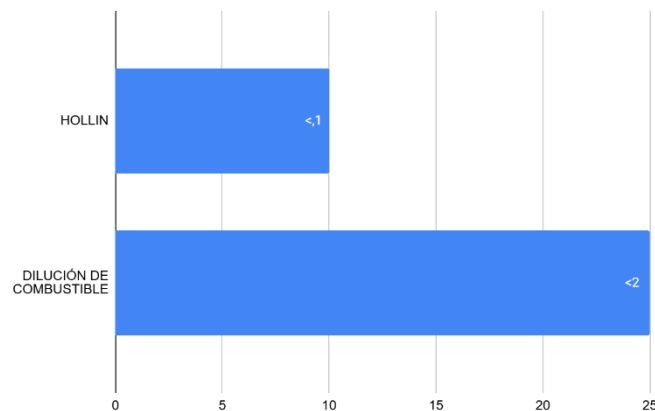
evitando errores en la ejecución de funciones estadísticas o modelos analíticos, y, al mismo tiempo, preserva la integridad de los resultados obtenidos.

#### 4.4.1.2 Limpieza Preliminar

En esta etapa se realizó una exploración exhaustiva de la base de datos con el objetivo de identificar valores especiales y muestras que pudieran afectar de manera adversa los procesos de análisis posteriores. Durante este procedimiento, se identificaron muestras que, aunque estaban registradas, se habían perdido en el flujo de procesamiento, lo que podría haber generado confusión con valores ausentes. Adicionalmente, se detectaron inconsistencias en los formatos de reporte en casos donde las concentraciones se encontraban por debajo del límite de detección (LOD) y eran representados mediante el símbolo “<”, tal como se ilustra en la figura siguiente:

**Figura 28.**

*Propiedades por debajo del límite de detección*



*Nota.* Esta figura se evidencia la cuantificación de los valores anómalos identificados en la base de datos.

En la Figura 28 se presentan dos propiedades con valores censurados, siendo dilución de combustible el que registra el mayor número de muestras con concentraciones inferiores a 2,

mientras que el hollín presenta 10 muestras con concentraciones inferiores a 0,1. Ante esto, se optó por reemplazar dichos valores por la mitad del límite reportado en concordancia con la metodología propuesta por (Helsel, 2018) quien sugiere esta práctica como una aproximación válida en contextos con baja proporción de datos censurados, permitiendo conservar la variabilidad del conjunto sin introducir sesgos significativos.

#### 4.4.1.3 Datos Faltantes

Posteriormente, se detecta y cuantifica la presencia de valores faltantes en cada propiedad, obteniéndose los siguientes resultados:

#### Figura 29

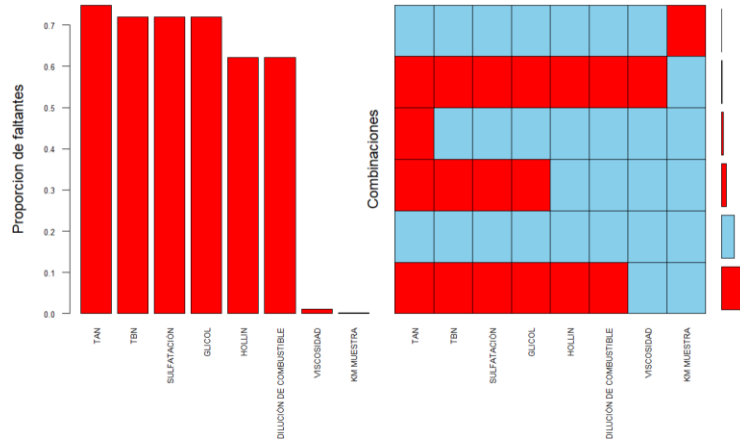
*Valores ausentes en la base de datos*

LABORATIO	CODIGO	TIPO. DE. FLOTA	PLACA	MUESTRA
0	0	0	0	0
COMPONENTE	FECHA. . . TOMA	FECHA. DE. RECEPCIÓN	HOLLIN	HIERRO. Fe
0	0	0	216	0
COBRE. Cu	PLOMO. Pb	ALUMINIO. Al	CROMO. Cr	ESTAÑO. Sn
0	0	0	0	0
ZINC. Zn	SILICIO. Si	VISCOSIDAD	KM. MUESTRA	SODIO. Na
0	0	4	0	0
OXIDACIÓN	DILUCIÓN. DE. COMBUSTIBLE	X. . Agua	KM. VEHICULO	UNDA
0	216	0	0	0
TAN	TBN	NITRACIÓN	SULFATACIÓN	GLICOL
261	250	0	250	250

*Nota.* Esta figura muestra de manera cuantitativa los valores faltantes por columna.

En esta figura se evidencia que determinadas propiedades, entre ellas glicol, TAN, TBN, hollín y dilución de combustible, presentan más de 200 registros ausentes dentro del conjunto de datos, lo cual representa una proporción significativa respecto al total de observaciones. Por esta razón, se procedió por la caracterización del patrón y mecanismo de los datos faltantes, dado que ello permite determinar si la ausencia de información ocurre de manera completamente aleatoria o si sigue un comportamiento estructurado, posiblemente asociado a causas específicas.

A fin de evaluar los patrones de ausentismo se empleó el paquete VIM (Visualization and Imputation of Missing Values) en R, el cual proporciona la siguiente figura:

**Figura 30***Patrón de datos faltantes*

*Nota.* Esta figura muestra la proporción y patrón valores faltantes por columna.

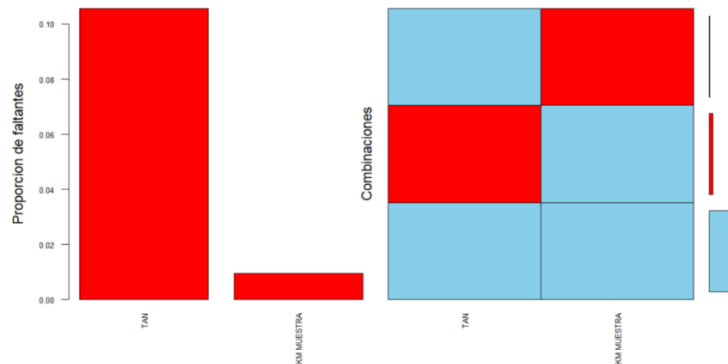
En la Figura 30 se presentan dos gráficos complementarios. En el panel izquierdo se muestra la proporción de valores faltantes por variable, mientras que el panel derecho ilustra un patrón específico en donde se señala la presencia de datos por medio de recuadros azules y mediante recuadros rojos su ausencia, cuya coincidencia sistemática en varias variables revela la coocurrencia de datos faltantes. Este fenómeno indica que ciertas variables tienden a presentar valores ausentes simultáneamente en los mismos registros, lo que sugiere que podrían estar asociadas a una causa subyacente común o a un procedimiento de registro que omita información de manera conjunta. Según (Calafati, 2017), este comportamiento corresponde a un mecanismo de omisión del tipo MAR (Missing At Random), lo que implica que la aplicación de estrategias de imputación apropiadas permite minimizar el sesgo en el análisis de los datos (Buuren, 2022).

En este contexto, se observa que propiedades como el hollín y dilución de combustible presentan un mismo nivel y patrón de ausentismo, al igual que el TBN, sulfatación y glicol entre sí. Por su parte, el TAN comparte las mismas características de este último grupo, aunque con un

patrón adicional exclusivo. En conjunto, estos comportamientos se explican, en gran medida, por la falta de discriminación de información en la base de datos de la compañía y al hecho de que, en algunos casos, las muestras fueron remitidas a un laboratorio distinto al correspondiente para el componente analizado. Esta situación implicó la aplicación de umbrales de análisis diferentes que, dependiendo de la propiedad evaluada, en ocasiones redujeron el alcance analítico originalmente previsto lo que derivó a su omisión, y en otras hicieron que ciertos parámetros no fueran aplicables. Para validar esta hipótesis, la siguiente figura muestra el comportamiento de los datos faltantes filtrados únicamente para el laboratorio encargado del análisis de motores.

### Figura 31

*Patrón de valores faltantes en las muestras analizadas por el laboratorio responsable del análisis de motores*



*Nota.* Esta figura muestra la proporción y patrón valores faltantes por columna filtrando por el laboratorio responsable del análisis del motor.

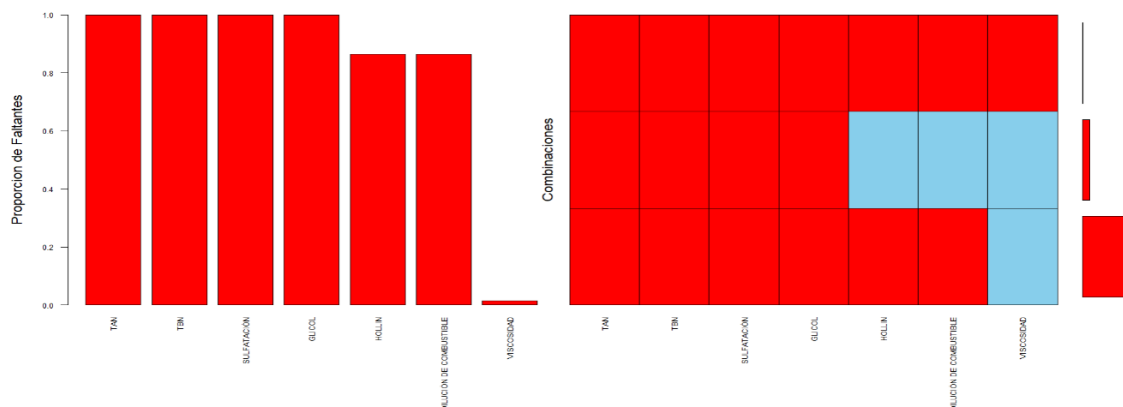
En la Figura 31 se muestran dos variables con datos faltantes. En el caso del kilometraje de la muestra, la omisión se atribuye a errores de digitación por parte del personal encargado, los cuales pueden corregirse fácilmente mediante la verificación de los historiales operativos de los vehículos y la comparación con los registros de lectura. En cuando al TAN, se registra un 11,3%

de datos ausentes, proporción que, según (Calafati, 2017), resulta suficientemente significativa como para requerir un análisis detallado debido a que genera sesgos. Para indagar en su origen, se revisaron los reportes del laboratorio, sin encontrarse variables asociadas a la omisión, cambios en los paquetes analíticos, criterios de discriminación por tipo de flota o unidad, ni diferenciaciones basadas en condiciones normales o críticas. En consecuencia, se clasifica como un mecanismo MCAR (Missing Completely At Random), el cual no introduce sesgos y garantiza que las inferencias estadísticas y los resultados derivados conserven la validez del análisis (YDaa, 2023).

De la misma manera, se realiza el proceso de filtrado para el laboratorio responsable del análisis de los diferenciales y la transmisión, cuyo resultado se ilustra de la siguiente manera:

**Figura 32.**

*Comportamiento de los valores faltantes en las muestras analizadas por el laboratorio 2*



*Nota.* Esta figura muestra la proporción y patrón valores faltantes por propiedad.

En esta figura se evidencia la ausencia total de propiedades como el TBN, sulfatación y glicol, lo cual se explica principalmente por la naturaleza de sus sistemas. No obstante, la omisión del TAN es especialmente crítica, ya que este parámetro permite cuantificar la degradación del aceite bajo condiciones de alta carga y temperatura, principales factores de falla en dichos equipos, por lo que su omisión puede sesgar evaluaciones técnicas posteriores.

Por otra parte, se registró un 13,5 % de valores presentes de dilución de combustible y hollín (recuadros azules), lo que confirma que algunas muestras de motor fueron procesadas en este laboratorio. En consecuencia, parámetros críticos para un análisis integral del estado del lubricante fueron omitidos debido a las limitaciones en el alcance del mismo. La ausencia de datos en la viscosidad evidenció un mecanismo de omisión similar al identificado en el TAN dentro del laboratorio de motor.

Finalmente, comprender la estructura real de la base de los datos y validar el mecanismo responsable de la omisión de información hace imprescindible identificar los vehículos afectados, con el fin de garantizar la consistencia y validez de los análisis posteriores. En este sentido, se procedió a cuantificar las muestras de cada componente según el laboratorio en el que fueron registradas. Cabe señalar que el Laboratorio 1 está a cargo de los análisis de las muestras de aceite correspondientes al componente motor, mientras que el Laboratorio 2 realiza los análisis de los componentes asociados a los diferenciales y a la transmisión

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las muestras del componente motor:

**Tabla 13**

*Muestras por laboratorios del motor*

<b>Placa</b>	<b>Laboratorio 1</b>	<b>Laboratorio 2</b>
GQU373	8	5
GQU374	11	2
TAV204	7	5
TAW355	9	4
TAX328	12	5
TTW562	7	2
TTW666	14	2
WFC639	12	2
XVU729	5	3

XVX650	8	4
Total	93	34

*Nota.* Esta tabla cuantifica las muestras enviadas a cada laboratorio del motor.

En la Tabla 11 se presentan las placas de los vehículos junto con el número de muestras de aceite procesadas en cada uno de los dos laboratorios. Estos resultados evidencian que todas las unidades graneleras registran al menos dos muestras de motor enviadas al laboratorio no correspondiente, lo que representa un total de 36 muestras afectadas, limitando la posibilidad de un análisis integral del lubricante e integrando un sesgo sistemático.

De forma análoga, se aplicó el mismo procedimiento para los diferenciales y la transmisión, obteniendo la siguiente tabla:

**Tabla 14.**

*Muestras por laboratorios de diferenciales y transmisión*

<b>Placa</b>	<b>Laboratorio 2</b>
GQU373	11
GQU374	30
TAV204	24
TAW355	27
TAX328	22
TTW562	12
TTW666	23
WFC639	26
XVU729	21
XVX650	20
Total	216

*Nota.* Esta tabla cuantifica las muestras de los diferenciales y la transmisión enviadas a cada laboratorio.

En esta tabla se observa que, para todas las muestras correspondientes a estos componentes, el procesamiento se efectuó de manera correcta, sin registrarse envíos erróneos. Esto garantiza la

consistencia en la medición de las propiedades de dichos sistemas y elimina la posibilidad de sesgos asociados a este factor.

#### **4.4.2 4.4.2 Imputación multivariable**

Con base en el análisis anterior, se identificó la presencia de dos mecanismos de ausencia entre estos el MAR, en el cual tanto el uso exclusivo de los casos completos como la omisión de los registros con valores faltantes conduciría a resultados sesgados (Mack C, 2018). Por lo tanto, se descartaron técnicas que eliminan o sustituyen los valores ausentes por una única estimación como la media, mediana, o estrategias como LOCF/BOCF y K-NN que tienden a reducir la variabilidad inherente de los datos, alterar la distribución original y distorsionar las relaciones entre variables (Codificando Bits, 2021). Además, investigaciones como (Estrategias para el tratamiento de datos faltantes ("missing data") en estudios con datos longitudinales, 2017) evidencian que dichas desventajas se acentúan cuando el porcentaje de datos faltantes superan el 5%, generando sesgos significativos en los resultados.

Frente a este panorama, se optó por emplear una técnica de imputación multivariable debido a que representa una alternativa más robusta y adecuada para este conjunto de datos, ya que permite preservar la variabilidad y estructura de la data, así como las correlaciones entre variables, lo cual resulta fundamental para garantizar la validez estadística y la precisión en los análisis posteriores (Van Buuren, 2018). En particular, se seleccionó un modelo capaz de capturar las relaciones complejas entre la variable objetivo y las predictoras, generando predicciones plausibles y coherentes mediante un algoritmo de imputación iterativa por ecuaciones encadenadas (MICE). Para ello, se empleó IterativeImputer de la librería sklearn de Python, el cual ejecuta un proceso iterativo en el que, en cada ciclo, se selecciona una variable con valores ausentes y se imputan sus registros. Dichas imputaciones se incorporan progresivamente como “nuevas pistas”

en las siguientes iteraciones, hasta que se cumple una de dos condiciones: (i) La tolerancia de cambio entre el valor imputado sea menor o igual  $1 \times 10^{-4}$  o (ii) se alcance un máximo de 50 iteraciones en la base de datos.

Por otro lado, se seleccionó ExtraTreesRegressor como el estimador principal, el cual tiene la capacidad de manejar relaciones complejas, tanto lineales como no lineales, sin requerir supuestos de distribución específicos. Adicionalmente, se implementaron controles de calidad en el proceso de imputación, restringiendo las estimaciones a valores mayores o iguales a cero, vinculando cada imputación con un identificador único conformado por la placa y el tipo de componente para evitar interferencias entre iteraciones, y limitando el procedimiento únicamente a aquellos identificadores que contaran con más de tres registros, de modo que el estimador pudiera entrenarse de manera adecuada.

Finalmente, una vez definida la estrategia de imputación junto con los criterios de convergencia (Apéndice C), el procedimiento se aplicó al subconjunto de muestras correspondientes al motor. Como punto de partida, se efectuó la cuantificación de los valores ausentes por variable, cuyos resultados se presentan a continuación:

**Tabla 15.**

*Datos faltantes en el motor*

<b>Propiedad</b>	<b>Numero de faltantes</b>
Numero de Acidez Total (TAN)	45
Sulfatación	34
Glicol	34
Numero Básico Total (TBN)	34

*Nota.* Esta figura muestra de manera cuantitativa los valores faltantes por propiedad en el motor.

En la Tabla 13 se observa que las propiedades afectadas por datos ausentes registran 34 valores faltantes, todos correspondientes al segundo laboratorio, a excepción del TAN, cuyos datos

incompletos se encuentran distribuidos en ambos laboratorios, en coherencia con lo expuesto previamente.

Posteriormente, con el propósito de validar los datos imputados, se evaluó la posible existencia de distorsiones en la base de datos mediante un enfoque comparativo entre la base original y la imputada. Para ello, se aplicó la Mann-Whitney, también denominada prueba de suma de rangos de Wilcoxon, la cual resulta adecuada cuando no se cumplen los supuestos de normalidad exigidos por la prueba t, que de acuerdo con la norma ASTM D7720, las propiedades analizadas presentan un comportamiento no paramétrico, lo que justifica la selección de este método. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos

**Tabla 16.**

*Test de Wilcoxon*

<b>Propiedad</b>	<b>P-value</b>
Numero de Acidez Total (TAN)	0.9188
Sulfatación Glicol	0.3375
Numero Básico Total (TBN)	0.6681
	0.8959

*Nota.* Esta tabla se muestra la probabilidad del test

En la Tabla 14, se muestran como los resultados de las pruebas no permitieron rechazar la hipótesis nula, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las poblaciones comparadas, de modo que la distribución de la base de datos imputada se considera equivalente a la original. De manera análoga, se evaluaron los componentes diferenciales y la transmisión, en el cual se identificaron cuatro registros ausentes en la variable viscosidad, valores que fueron imputados y validados mediante el mismo procedimiento en donde se obtuvo un *p*-value de 0.8704, lo que refleja una alta concordancia entre ambas bases. Por lo tanto, se concluyó

que el proceso de imputación fue exitoso, dado que no generó sesgos que alteraran de manera relevante la estructura de la información.

#### 4.4.3 4.4.3 Definición del conjunto de datos

En la sección 4.2 se contextualizaron las unidades graneleras, demostrando que los vehículos analizados pertenecen a una misma categoría en los componentes seleccionados para el estudio. Esta clasificación se respalda en la documentación técnica, la cual confirma que todas las unidades emplean un mismo tipo de lubricante, mantienen procedimientos estandarizados para los intervalos de cambio de aceite y filtros (Apéndice C) y, adicionalmente, en diversas reuniones de operación fueron declaradas como equipos que trabajan bajo condiciones de servicio comparables. No obstante, la norma ASTM-D7720 enfatizó la necesidad de ejercer precaución en la conformación de las poblaciones de equipos, ya que una agrupación inadecuada compromete la confiabilidad de los límites estadísticos calculados.

Con el fin de garantizar la comparabilidad de los datos, se evaluó la homogeneidad de varianzas mediante el test de Fligner-Killeen debido al comportamiento no paramétrico de las propiedades asociadas a la contaminación, el desgaste y la degradación del lubricante (ASTM INTERNATIONAL, 2017).

Los valores de *p-value* obtenidos para los diferentes componentes se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 17.**

#### *Prueba de Homocedasticidad*

Propiedad	Motor	Transmisión	Diferencial Frontal	Diferencial Trasero
TAN	0.05965	-	-	-
Hollín	0.5267	-	-	-
Hierro	0.1720	0.05594	0.0864	0.0821

Plomo	0.2581	0.4863	0.0563	0.1174
Aluminio	0.6796	0.05681	0.5339	0.0525
Cromo	0.7512	0.4344	0.05807	0.0624
Estaño	0.5733	0.413	0.1626	0.1995
Zinc	0.2102	0.2649	0.0987	0.73108
Silicio	0.3454	0.05183	0.3859	0.1673
Viscosidad	0.1334	0.7004	0.0851	0.1673
Sodio	0.07989	0.5141	0.09839	0.3844
Oxidación	0.050	0.5241	0.09779	0.4844
Dilución de Combustible	0.2689	-	-	-
% Agua	0.05112	-	0.08580	0.05104
Nitración	0.3832	0.4872	0.3025	0.3996
Sulfatación	0.08713	-	-	-
Glicol	0.7444	-	-	-
TBN	0.2301	-	-	-

*Nota.* Esta tabla muestra los valores proporcionados de la probabilidad en la que los datos que rechazan o no hipótesis nula de la prueba de homocedasticidad.

Los resultados obtenidos en la Tabla 15 hacen referencia al p-value para cada uno de los componentes evaluados. En todos los casos los valores fueron superiores a 0.05, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula de homogeneidad de varianzas. En consecuencia, los datos pueden considerarse estadísticamente comparables. Cabe señalar que, en las propiedades sin resultado reportado, la causa corresponde a variables que no fueron evaluadas en determinados componentes. La única excepción es el %Agua en el componente transmisión, en el cual el software arrojó un valor NA debido a que todas las muestras presentaron un valor constante de 0 %, lo que implica ausencia de varianza y, por tanto, imposibilidad de aplicar la prueba.

#### **4.4.4 4.4.4 Caracterización estadística de las propiedades**

De acuerdo con los lineamientos establecidos para la definición de límites de alarma, es indispensable verificar la naturaleza de los datos por cada propiedad a analizar. Para este fin, la ASTM D7720 remite a la ASTM D6299, la cual indica que dicha comprobación puede realizarse mediante inspección visual o, de manera más rigurosa, mediante la aplicación de pruebas

estadísticas de normalidad. Dentro de estas, la norma señala que la prueba de Anderson-Darling (A-D) constituye el procedimiento más robusto para evaluar el ajuste de los datos a una distribución normal.

Considerando lo anterior, se aplicó el test A-D a la viscosidad en cada uno de los componentes evaluados, dado que esta propiedad tiende a presentar un comportamiento de tipo paramétrico (ASTM INTERNATIONAL, 2017), obteniéndose los resultados que se presentan a continuación:

**Tabla 18.**

*Prueba A-D en la Viscosidad*

<b>Componente</b>	<b><i>P-value</i></b>
Motor	$2.45 \times 10^{-12}$
Diferencial Frontal	$1.09 \times 10^{-7}$
Diferencial Trasero	$8.56 \times 10^{-13}$
Transmisión	0.4016

*Nota.* Esta tabla se muestra la probabilidad en la que los datos que rechazan o no hipótesis nula de la prueba A-D.

En la Tabla 16 se observa que la mayoría de los componentes presentan valores inferiores al nivel de significancia, lo que conduce al rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ) de normalidad. En consecuencia, se concluye que la viscosidad en estos casos no sigue una distribución normal, posiblemente debido a las nivelaciones de aceite realizadas durante la operación, las cuales pudieron modificar las concentraciones y alterar el comportamiento esperado de la propiedad. La única excepción corresponde al componente transmisión, cuyo *p-value* fue superior a 0.05 y, por tanto, se asume que mantiene un patrón paramétrico.

#### 4.4.5 4.4.5 Exploración de datos según su causa: Comunes y especiales.

En esta fase se llevó a cabo un análisis univariado por propiedad con el objetivo de identificar anomalías en la base de datos de cada componente. El procedimiento se orientó a distinguir entre variabilidad atribuible a causas comunes, propias del comportamiento esperado del sistema, y causas especiales, relacionadas con eventos puntuales que pueden distorsionar los valores registrados. Como resultado, para el componente motor se obtuvieron los siguientes indicios:

**Tabla 19.**

*Estadística descriptiva del motor*

<b>Propiedad</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>RI</b>
Hollín	0	11	0,15	1,69	1,54
Hierro	2,88	1448	6,805	19,685	12,88
Cobre	0	172	1	2	1
Plomo	0	13,13	0,465	1,945	1,48
Aluminio	0	32,71	1,82	3,625	1,805
Cromo	0	11,87	0,29	1,18	0,89
Estaño	0	6,96	0,1	3,22	3,12
Zinc	209,56	1486	1132,5	1310,5	178
Silicio	0,17	181	3,395	7	3,605
Viscosidad	11,1	22	12,4	14,51	2,11
Sodio	1,44	138,5	2,26	10	7,74
Oxidación	0	56	12,2	16,65	4,45
Dilución de Combustible	0	151,1	0	1	1
%Agua	0	1,1194	0	0,0448	0,0448
TAN	0	26,51	2,16	7,674	5,514
TBN	0	13,4	6,025	7,25	1,225
Nitración	0	2023	4,55	8,1	3,55
Sulfatación	0	44	19,47	22,6	3,13
Glicol	0	1,2	0	0	0

*Nota.* La tabla presenta la estadística descriptiva del motor para la aplicación de la regla de Tukey.

En primera instancia, en la Tabla 17 se detectan concentraciones alarmantes de hierro, sodio y silicio, parámetros que pueden interpretarse como indicativos de distintos mecanismos de

deterioro o contaminación. Asimismo, se observan concentraciones elevadas en nitración, lo que podría estar asociada a deficiencias en el sistema de inyección, sistema de refrigeración o a su sistema de postratamiento. Por otro lado, la viscosidad presenta registros superiores e inferiores respecto al valor de referencia de la muestra virgen analizada (Apéndice B) que pueden estar asociado a problemas por dilución de combustible, oxidación del aceite, acumulación de hollín o cizallamiento. En este contexto, resulta necesario identificar de manera sistemáticamente los valores que se apartan del comportamiento esperado de la población de datos, con el fin de determinar su exclusión. Para ello, se aplicó la definición de límites propuesta por la regla de Tukey, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 20.**

*Límites de la regla de Tukey en el Motor*

<b>Propiedad</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Límite Inferior</b>
Hollín	4	0
Hierro	39	0
Cobre	3,5	0
Plomo	4,2	0
Aluminio	6,3	0
Cromo	2,5	0
Estaño	7,9	0
Zinc	1577,5	865,5
Silicio	12,41	0
Viscosidad	17,68	9,235
Sodio	21,61	0
Oxidación	23,33	5,525
Dilución de Combustible	2,5	0
% Agua	0,11	0
TAN	15,95	0
TBN	9,09	4,1875
Nitración	13,425	0
Sulfatación	27,295	14,775
Glicol	0	0

*Nota.* Esta tabla muestra los límites establecidos según la regla de Tukey para la detección de datos anómalos.

En la Tabla 20 se presentan los límites establecidos para cada propiedad, los cuales permiten identificar valores atípicos que serán analizados en relación con el historial de intervenciones y los costos asociados a cada unidad. En particular, para el Zinc y el Número de Basicidad Total (TBN) se decidió otorgar especial atención a los valores por debajo del límite inferior, ya que estos reflejan condiciones críticas de deterioro, mientras que los valores por encima del límite superior no necesariamente representan un problema. En el caso del zinc, concentraciones reducidas evidencian una pérdida de aditivo antidesgaste ZDDP, lo que incrementa el riesgo de deterioro prematuro en las superficies metálicas; en contraste, valores elevados suelen estar asociados a las nivelaciones de aceite efectuadas durante el periodo de análisis. De manera similar, un TBN bajo indica una disminución en la capacidad del lubricante para neutralizar los ácidos generados en la combustión, lo que aumenta la probabilidad de corrosión y degradación del aceite, mientras que niveles por encima del límite superior no reflejan un riesgo inmediato para el desempeño, aunque pueden ser indicativos de una posible mezcla de lubricantes cuando superan los valores de referencia de la muestra virgen.

Por otro lado, se efectuó un análisis de estas muestras y en concordancia con el criterio del personal responsable del área, se estableció que ciertos registros presentaban comportamientos no coherentes con la respuesta fisicoquímica esperada de una misma muestra de aceite. Dichos valores fueron considerados inconsistentes y, por lo tanto, excluidos del análisis estadístico para la determinación de límites de alarma. Entre los principales hallazgos se destacan:

- Muestras con altos niveles de dilución de combustible que, en lugar de mostrar una disminución en la viscosidad, registraron valores superiores, acompañados de un TBN inusualmente elevado respecto al valor de referencia.
- Registros con contenido elevado de silicio sin correlación con incrementos en metales de desgaste, situación que no corresponde a un proceso real de abrasión y que sugiere una posible anomalía en el análisis o contaminación durante la toma de muestra.
- Casos con altos niveles de sodio sin presencia de agua, dilución de combustible, glicol, o signos de degradación del lubricante, condición que no refleja un comportamiento real de sus propiedades.
- Muestras con altas concentraciones de cobre sin indicios de glicol que justificará su presencia por ingreso de refrigerante (Noria, 2024), ni se evidencia elementos de desgaste como plomo y/o estaño asociados a la degradación de cojinetes o bujes. Tampoco se evidenció presencia de agua, silicio u oxidación que es un catalizador de dicho proceso (Castrol, 2023), ni registros de novedades en las unidades analizadas. Además, dado que los vehículos no corresponden a unidades nuevas, se descarta el fenómeno de lixiviación del núcleo del enfriador por formación de sulfuros de cobre (Noria, 2024).
- Muestras con concentraciones elevadas de nitración proveniente de la formación de óxidos nitrosos por efecto de temperaturas elevadas; no obstante, no se reportaron fallas en el sistema de refrigeración ni variación de viscosidad.
- Registros de sulfatación iguales a cero, condición incoherente con los procesos normales de combustión que plantea dudas sobre la validez de dichos resultados.

Por otro lado, en la transmisión de los vehículos graneleros se obtuvieron los valores preliminares para el cálculo de los límites según las reglas de Tukey:

**Tabla 21.**

*Estadística Descriptiva para la transmisión*

<b>Propiedad</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>RI</b>
Hierro	8	523	62	224	162
Cobre	1	235	6	49	43
Plomo	0	3	0	1	1
Aluminio	0	32	3	14	11
Cromo	0	5	1	2	1
Estaño	0	2	0	1	1
Zinc	10	1309	40	919	879
Silicio	1	485	12	74	62
Viscosidad	12,1	19,9	14,7	17,3	2,6
Sodio	2	47	7	36	29
Oxidación	2	47	7	36	29
% Agua	0	0	0	0	0
Nitración	2	6	3	5	2

*Nota.* La tabla presenta la estadística descriptiva de la transmisión para la aplicación de límites asociados a la identificación de datos anómalos.

En la Tabla 21, se evidencian valores que, a diferencia del motor, muestran concentraciones más elevadas de metales como el hierro y cobre, lo cual se justifica por el mayor contacto entre las superficies de los engranajes, donde los mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo son más frecuentes. Además, dentro de los elementos detectados resalta el silicio, cuyos valores elevados requieren especial atención, ya que la contaminación externa por partículas sólidas genera un desgaste prematuro en las piezas internas.

Los límites de detección de estos valores anómalos se muestran a continuación:

**Tabla 22.***Límites de Tukey en la transmisión*

<b>Propiedad</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Límite Inferior</b>
Hierro	467	0
Cobre	113,5	0
Plomo	2,5	0
Aluminio	30,5	0
Cromo	3,5	0
Estaño	2,5	0
Zinc	2237,5	0
Silicio	167	0
Viscosidad	21,2	10,8
Sodio	79,5	0
Oxidación	79,5	0
% Agua	0	0
Nitración	8	0

*Nota.* Esta tabla muestra los límites establecidos según la regla de Tukey para la detección de datos anómalos.

En la tabla se aprecia que, para el caso del zinc, el límite inferior resultó en un valor de cero. Esta condición se debe a que un gran grupo de muestras presentaron concentraciones muy bajas y, además, no se dispone de un valor de referencia proveniente del análisis de una muestra de aceite virgen. Por tal motivo, se optó por someter dichos valores a revisión con el equipo del área, con quienes se concluyó que estos no representan una variación atribuible a causas especiales que justifiquen su eliminación. Por otro lado, se presenció en diversas muestras altas concentraciones de silicio sin evidencia de un fenómeno de desgaste asociado por lo que fueron consideradas anómalas y, en consecuencia, se omitieron para los posteriores análisis.

De igual manera, se realizó el cálculo de las variables estadísticas requeridas para la obtención de los límites en los diferenciales. Para el diferencial trasero se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 23.***Estadística descriptiva para el diferencial trasero*

<b>Propiedad</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>RI</b>
Hierro	26	2191	70,5	301	230,5
Cobre	0	158	1	3	2
Plomo	0	3	0	0,5	0,5
Aluminio	0	57	2	8	6
Cromo	0	11	0	1	1
Estaño	0	5	0	1	1
Zinc	4	234	12,5	33	20,5
Silicio	4	122	13,5	51,5	38
Viscosidad	14,5	29,7	23,575	27	3,425
Sodio	1	32	3	4	1
Oxidación	1	32	3	4	1
% Agua	0	0,4	0	0	0
Nitración	1	8	3	4	1

*Nota.* La tabla presenta la estadística descriptiva del diferencial trasero para la aplicación de la regla de Tukey

En la Tabla 23 se evidencian concentraciones elevadas de hierro, las cuales podrían estar relacionadas con la falla total de alguna unidad granelera o, en su defecto, con registros que no corresponden al proceso real. Para la identificación de los valores anómalos, los límites establecidos para este componente se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 24.***Límites de Tukey en el diferencial trasero*

<b>Propiedad</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Límite Inferior</b>
Hierro	646,75	0
Cobre	6	0
Plomo	1,25	0
Aluminio	17	0
Cromo	2,5	0
Estaño	2,5	0
Zinc	63,75	0
Silicio	108,5	0

Viscosidad	32,1375	18,44
Sodio	5,5	1,5
Oxidación	5,5	1,5
% Agua	0	0
Nitración	5,5	1,5

*Nota.* Esta tabla muestra los límites establecidos según la regla de Tukey para la detección de datos anómalos.

De acuerdo con los umbrales establecidos de la Tabla 24, se realizó la evaluación de los registros de las muestras, en la cual se identificaron los siguientes comportamientos atípicos:

- Muestras con contenido elevado de cobre, comportamiento que no resulta coherente debido a que este componente no contiene elementos principales fabricados con dicho metal. Además, el vehículo asociado carecía de un historial de tendencia, por lo que su presencia puede atribuirse a un error en la identificación de la muestra o a una contaminación externa durante la toma o en su respectivo análisis.
- Muestras con alto contenido de silicio sin correlación con la presencia de metales de desgaste, lo que descarta un proceso real de abrasión.

Por último, se procedió de la misma manera para el diferencial delantero, obteniéndose los siguientes valores:

**Tabla 25.**

*Estadística en el diferencial frontal*

<b>Propiedad</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>RI</b>
Hierro	14	979	55,75	222	166,25
Cobre	0	374	2	49,25	47,25
Plomo	0	2	0	1	1
Aluminio	0	68	1	3,25	2,25
Cromo	0	7	0	1	1
Estaño	0	6	0	2	2
Zinc	1	262	14,5	40	25,5

Silicio	3	999	11,75	30,25	18,5
Viscosidad	13,7	40,6	22,15	26,55	4,4
Sodio	2	35	3	5	2
Oxidación	2	35	3	5	2
%Agua	0	0	0	0	0
Nitración	1	5	3	4	1

*Nota.* La tabla presenta la estadística descriptiva del diferencial frontal para la aplicación de la regla de Tukey

En la Tabla 25 se evidencian concentraciones elevadas de silicio y hierro, indicativas de procesos de contaminación externa por partículas abrasivas y de desgaste significativo dentro del componente. Para su respectivo análisis los límites se presentan a continuación:

**Tabla 26.**

*Límites de Tukey en diferencial frontal*

<b>Propiedad</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Límite Inferior</b>
Hierro	471,375	0
Cobre	120,125	0
Plomo	2,5	0
Aluminio	6,625	0
Cromo	2,5	0
Estaño	5	0
Zinc	78,25	0
Silicio	58	0
Viscosidad	33,15	15,55
Sodio	8	0
Oxidación	8	0
%Agua	0	0
Nitración	5,5	1,5

*Nota.* Esta tabla muestra los límites establecidos según la regla de Tukey para la detección de datos anómalos.

De acuerdo con los límites establecidos para la detección de situaciones anómalos reflejados en la Tabla 26, se identificaron los siguientes comportamientos atípicos:

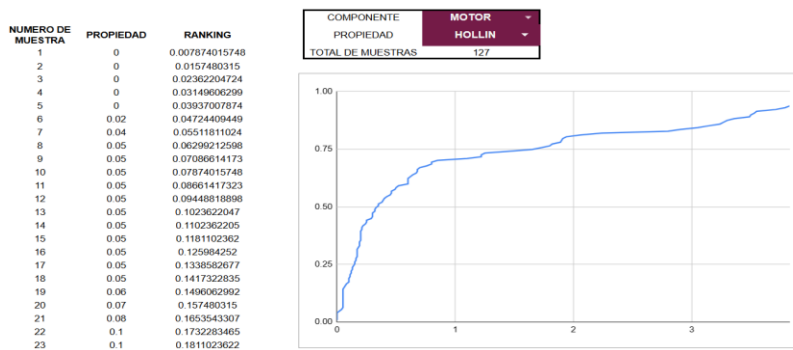
- Altas niveles de cobre sin presencia simultánea de silicio u otros metales de desgaste. Por lo que este comportamiento se atribuye principalmente al divisor de potencia, dado que es uno de los pocos elementos del sistema que incorpora componentes a base de cobre o sus aleaciones.
- Muestras con contenido elevado de silicio sin correlación con metales de desgaste significativos ni registro de novedades operativas, lo que sugiere un evento de contaminación durante la toma de la muestra.

**4.4.6 4.4.6 Técnica Distribución Acumulativa**

El conjunto de información seleccionado para la determinación de límites de alarma se evaluó aplicando la técnica de distribución acumulativa, conforme a lo establecido en la norma ASTM D7720. Para este propósito, se diseñó una herramienta en Microsoft Excel (Figura 33) que automatizó la selección del componente y de la propiedad de interés, ordenando los datos en forma ascendente y generando de manera automática la curva acumulativa del conjunto de datos. Esta implementación permitió contrastar el comportamiento de cada propiedad con los patrones estadísticos descriptos.

**Figura 33.**

*Interfaz de la CDF*



*Nota.* Esta figura muestra la interfaz empleada para la ejecución de la técnica

En esta herramienta se corroboró los comportamientos observados en cada propiedad, según lo correspondiente con las tipologías descritas en las figuras 5,6 y 7 A partir de esto, se identificaron comportamientos particulares en algunas propiedades, tales como:

- El Zinc en la transmisión y el diferencial frontal presentó un comportamiento, atribuible principalmente a la naturaleza del lubricante en uso. En los diferenciales se emplea un aceite de clasificación GL-5, que no contiene zinc en concentraciones significativas como aditivo antidesgaste, situación corroborada en la muestra virgen (Apéndice B). No obstante, en los casos donde se detectaron concentraciones elevadas de zinc, estas coincidieron con altos niveles de metales de desgaste, lo que se relaciona con el divisor de potencia, el cual somete a dicho componente a mayores esfuerzos, y por ende, a mayor desgaste. De manera similar, en la transmisión se identificaron muestras con altos contenidos simultáneos de zinc y metales de desgaste, lo que sugiere la posible contribución de componentes internos fabricados en latón o provistos de recubrimientos protectores, responsables de la liberación conjunta de zinc y otros metales al lubricante.
- En el motor, la dilución de combustible presentó un comportamiento mixto en donde inicialmente seguía una distribución de referencia cero y en su evolución adoptó una configuración escalonada. Esta tendencia se asocia a la configuración mecánica de los vehículos evaluados, que cuentan con sistema de inyección directa, condición que incrementa la probabilidad de que el combustible entre en contacto con el aceite particularmente en presencia de inyectores defectuosos (Noria, Las mejores pruebas para detectar la dilución por combustible, 2024). La fase de escalonamiento, por su parte, se relaciona con eventos operativos específicos, tales como la regeneración del

DPF en el sistema de postratamiento, arranques en frío o fugas de gases de escape, que generan incrementos puntuales en la concentración de combustible dentro del lubricante. Este comportamiento, además, pudo corroborarse mediante la correlación con los historiales de novedades operativas de las unidades evaluadas.

- La Nitración en diferenciales y transmisión mostró un patrón de frecuencia discreta debido a que la formación de óxidos nitrosos en estos componentes ocurre únicamente bajo condiciones muy particulares tales como cargas térmicas elevadas o largos periodos sin recambio de aceite, dando así un comportamiento basado en sus condiciones de operación.
- La oxidación en el motor no mostró un comportamiento de referencia cero, sino de referencia alta, explicado por la composición química del lubricante en uso, que incorpora compuestos oxigenados naturales. Esta condición fue confirmada en la muestra virgen (Apéndice B) y constituye la base de referencia que explica el comportamiento observado en la distribución acumulativa

Finalmente, a partir de los comportamientos característicos identificados en cada propiedad, se definieron los umbrales de alarma por condición. En el caso del motor, estos valores se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 27.**

*Limites condenatorios del motor*

<b>Propiedad</b>	<b>Normal</b>	<b>Alerta</b>	<b>Critico</b>
Hollín	1.9	2.9	3.36
Hierro	20.55	24	31
Cobre	1.7	2	2.5
Plomo	2	2.6	3
Aluminio	3.97	4.24	5.6

Cromo	1.3	1.46	2.04
Estaño	3.85	4.28	4.86
Sodio	11	11	13
Oxidación	17	17	17.7
% Agua	0.05	0.057	0.072
Dilución de Combustible	1	1.1	1.3
Sulfatación	23.6	24.6	25.9
Glicol	0	0	0
TAN	10.49	12.03	16.72
Silicio	7.08	9.11	12.1
Nitración	8.2	9	10

*Nota.* Esta tabla muestra los limites estadísticos condenatorios declarados para la flota en el componente motor.

En la Tabla 27, se adoptó una clasificación de tres niveles de alarma que se definen de la siguiente manera:

- Normal: condición aceptable dentro del rango esperado de operación.
- Alerta: presencia de una desviación incipiente que sugiere el inicio de un posible modo de falla. No requiere acción inmediata, pero sí un seguimiento.
- Crítico: deterioro significativo que demanda un análisis complementario y, en la mayoría de los casos, una posible intervención.

De manera complementaria, estos fueron comparados con los limites críticos actualmente utilizados en la flota, que se ven reflejados en la siguiente figura:

**Figura 34.***Límites de la flota granelera en la actualidad*

COMPONENTE.	PARAMETRO	LÍMITE FABRICANTE	LÍMITE FLOTA
MOTOR	HIERRO	50	37
	COBRE	26	4
	PLOMO	26	4
	ALUMINIO	16	5
	CROMO	11	2
	ESTAÑO	16	4
	ZINC	0	1362
	SODIO	16	11
	SILICIO	15	12
	HOLLIN	3	3
	VISCOSIDAD MAX	17	16
	VISCOSIDAD MIN	12	13
	% COMBUSTIBLE	2	
	OXIDACIÓN	18	18
	NITRACIÓN	10	10

*Nota.* Esta figura ilustra los límites establecidos con actualmente en la flota granelera en la empresa avícola.

En la figura se observa que, para la mayoría de las propiedades, los valores definidos en este estudio son más restrictivos. Esto indica que los criterios vigentes en la operación tienden a ser permisivos, retrasando la detección de fallas hasta etapas más avanzadas. Sin embargo, se observaron excepciones relevantes en el aluminio y el estaño, cuyos límites críticos resultaron ligeramente superiores a los empleados por el área de mantenimiento automotriz. En el caso del aluminio, este se asocia al desgaste en diversas zonas del motor como en el turbocargador (rueda del compresor), pistones y, en motores ISX a la carcasa de la bomba de aceite (Cummins, 2021). Por su parte, el estaño, en combinación con otros metales, constituye un indicador de desgaste en cojinetes, rodamientos o bujes (Noria, 2024), lo que resalta la importancia de un monitoreo continuo.

Asimismo, se validaron los límites definidos con la literatura. En particular con el estudio (Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diesel mediante la técnica de análisis de aceite, 2024), que recopiló información de fabricantes como Cummins, cuyos valores de referencia resultaron considerablemente más altos que los obtenidos en este análisis respaldando la validez técnica y estadística de los umbrales adoptados.

En cuanto a las propiedades como viscosidad y el número básico total (TBN), se evidenció un comportamiento particular que justificó su análisis separado, conforme a los lineamientos de la norma. Los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 28.**

*Límites de alarma para el motor (Viscosidad-TBN)*

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Verde-Amarillo</b>	<b>Amarillo-Rojo</b>
<b>Viscosidad</b>			
Máxima	cSt	16,41	17,21
Mínima	cSt	11,88	11,7
<b>TBN</b>	Mg/KOH/g	5,5	< 4,5

*Nota.* Esta tabla muestra los límites estadísticos condenatorios en la viscosidad y el TBN para la flota en el componente motor.

En este caso, en la Tabla 24, la viscosidad se evaluó mediante límites máximos y mínimos por nivel de alarma. Esto se debe a que su variación puede manifestarse en una disminución, vinculada al adelgazamiento de la película del lubricante por efecto de dilución de combustible u otros factores que reducen la capacidad de carga del fluido; o a un espesamiento asociado a procesos de oxidación, acumulación de hollín y contaminación por partículas, que incrementan la resistencia al flujo.

Por otro lado, las zonas de alarma se interpretan de la siguiente manera:

- Verde-Amarillo: Desviaciones moderadas respecto al rango de referencia, que indican condición de precaución y necesidad de seguimiento.
- Amarillo-Rojo: Exceden los márgenes de tolerancia técnica, representando una condición de riesgo operativo que exige intervención inmediata (cambio de aceite o verificación del estado del componente).

Por otro lado, la validación de estos valores se sustentó en la literatura, proveniente del estudio previamente citado, en donde Cummins recomienda que la viscosidad no varíe más de  $\pm 4$  cSt respecto al aceite virgen, mientras que el TBN no debe descender por debajo del 50 % del valor inicial o alcanzar el mismo nivel del TAN. De igual manera, el (Estudio de rendimiento de lubricantes en compañías constructoras, impacto económico y alternativas ecológicas para el uso de aceite usado, 2020) establece que la viscosidad no debe disminuir más del 25 % ni aumentar más del 35 % respecto al aceite nuevo, dado que tales desviaciones comprometen la capacidad protectora del lubricante. En este análisis, los valores registrados no superaron dichos márgenes.

Para los sistemas de engranajes se adoptó igualmente el esquema de tres niveles de control. Se omitieron muestras posteriores a intervenciones mayores en la transmisión y diferenciales debido a que presentaban altos niveles de metales correspondientes al fenómeno de asentamiento propio de los engranajes. La información recopilada de estas intervenciones se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 29.**

*Intervenciones mayores en los sistemas de engranajes*

<b>Placa</b>	<b>Diferenciales</b>	<b>Transmisión</b>
TAW355	22/10/21	1/12/23
XUV61	11/09/23	-
WFC639	08/09/23	06/12/2023
TTW562	14/12/21	-

TAX328	21/04/22	-
--------	----------	---

*Nota.* Esta tabla muestra las placas con historiales de intervención mayor en sus diferenciales y transmisión.

En la Tabla 29, indica como solamente la mitad de los vehículos analizados han sido intervenidos desde 2021 hasta la actualidad. Además, el 60% de las unidades no han sido intervenidas en la transmisión lo que sugiere que se aproximan a su ciclo de mantenimiento mayor.

Dentro de este marco, se presentan los límites establecidos para el diferencial frontal:

**Tabla 30**

*Límites de alarma en el diferencial frontal*

Propiedad	Normal	Alerta	Critico
Hierro	206	228	343
Cobre	64	81	117
Plomo	0	1	1
Aluminio	3	4	6
Cromo	1	2	>2
Estaño	2	3	>3
Sodio	<5	5	6
Oxidación	<5	5	6
Silicio	26	27	30
Nitración	<4	4	>4
Zinc	40	51	205

*Nota.* Esta tabla muestra los límites estadísticos condenatorios declarados para la flota en el diferencial frontal.

De igual manera, se calcularon los límites para el diferencial trasero que se muestran a continuación:

**Tabla 31.**

*Límites de alarma para el diferencial trasero*

Propiedad	Normal	Alerta	Critico
Hierro	254	296	374
Cobre	<2	2	>3
Plomo	<1	1	>2

Aluminio	7	8	>9
Cromo	1	2	>2
Estaño	1	2	>2
Sodio	<5	5	>6
Oxidación	<5	5	>6
Silicio	51	52	70
Nitración	<4	4	>4
Zinc	36	48	51

*Nota.* Esta tabla muestra los límites estadísticos condenatorios declarados para la flota en el diferencial trasero.

En la Tabla 30 y Tabla 31, diversos límites establecieron por encima o por debajo del valor de alarma. Esto se debe al historial del comportamiento de cada propiedad, que discusión con el equipo de trabajo se optó por dejarlos de tal manera. Por otro lado, al comparar dichos límites entre componentes se observó que el diferencial trasero presenta límites más amplios para el hierro, un metal indicador directo del desgaste de engranajes. Este hallazgo resultó relevante, dado que el diferencial frontal incorpora un divisor de potencia, lo cual, en principio, lo haría más susceptible al desgaste. Por lo tanto, se indagó este comportamiento en la base de datos de las muestras analizadas de la flota, cuyos resultados se ilustran a continuación:

**Figura 35.***Base de datos diferenciales*

COMPONENTE	FECHA TOMA	FECHA DE RECEPCIÓN	HIERR O Fe	COBR E Cu
DIFERENCIAL TRASERO	10/11/2023	23/11/2023	47	1
DIFERENCIAL FRONTAL	10/11/2023	23/11/2023	31	15
DIFERENCIAL FRONTAL	12/05/2023	19/05/2023	16	2
DIFERENCIAL TRASERO	1/11/2023	13/11/2023	296	1
DIFERENCIAL FRONTAL	1/11/2023	10/11/2023	49	13
DIFERENCIAL FRONTAL	24/04/2023	27/04/2023	979	3
DIFERENCIAL TRASERO	14/04/2023	27/04/2023	800	4
DIFERENCIAL FRONTAL	14/04/2023	27/04/2023	239	118
DIFERENCIAL TRASERO	10/06/2023	10/07/2023	179	1
DIFERENCIAL FRONTAL	10/06/2023	10/07/2023	198	13
DIFERENCIAL TRASERO	30/06/2023	31/07/2023	80	1
DIFERENCIAL FRONTAL	30/06/2023	31/07/2023	55	3
DIFERENCIAL FRONTAL	9/02/2023	29/03/2023	296	22
DIFERENCIAL FRONTAL	27/01/2023	13/02/2023	228	17
DIFERENCIAL FRONTAL	12/09/2023	29/09/2023	131	13
DIFERENCIAL FRONTAL	21/03/2023	30/03/2023	48	28
DIFERENCIAL TRASERO	12/09/2023	21/09/2023	160	1
DIFERENCIAL TRASERO	21/03/2023	30/03/2023	118	1
DIFERENCIAL TRASERO	26/01/2023	13/02/2023	123	1
DIFERENCIAL TRASERO	26/01/2023	13/02/2023	73	0
DIFERENCIAL FRONTAL	27/09/2023	30/10/2023	90	2
DIFERENCIAL FRONTAL	2/08/2023	6/09/2023	56	4
DIFERENCIAL FRONTAL	10/05/2023	19/05/2023	67	1

*Nota.* Esta figura ilustra las concentraciones de las muestras en los diferenciales asociados al desgaste.

En esta se identificó una mayor proporción de registros con elevadas concentraciones de hierro en el diferencial trasero, probablemente asociados al engranaje principal y al juego entre dientes. En contraste, el diferencial frontal mostró mayores concentraciones de cobre relacionadas con el desgaste de elementos fabricados en bronce, tales como bujes o casquillos, así como componentes vinculados al divisor de potencia, acoplamientos o el frenador de empalmes (Quintero, 2025).

Respecto a la viscosidad en estos componentes, los límites establecidos se muestran en la Tabla 32, y posteriormente se comparan con la norma SAE J306.

**Tabla 32.***Límites condenatorios en la viscosidad en los diferenciales*

Componente	Límite	Verde-Amarillo	Amarillo-Rojo
Diferencial	Máximo	28,6	28,9

Trasero	Mínimo	17,2	16
Diferencial	Máximo	27,8	28,8
Frontal	Mínimo	17,3	<17

*Nota.* Esta tabla muestra los límites estadísticos condenatorios de la viscosidad para la flota en sus diferenciales.

Los valores reflejados en la tabla se mostraron dentro de los márgenes establecido, según (Total Energies, 2019).

Finalmente, para la transmisión los límites condenatorios reflejaron los siguientes resultados:

### **Tabla 33**

#### *Límites condenatorios de la transmisión*

<b>Propiedad</b>	<b>Normal</b>	<b>Alerta</b>	<b>Critico</b>
Hierro	252	271	381
Cobre	54	56	65
Plomo	1	1	2
Aluminio	14	15	20
Cromo	2	2	3
Estaño	1	1	1
Sodio	37	40	42
Oxidación	37	40	42
Silicio	<56	86	106
Nitración	<5	5	>6
Zinc	<940	985	>1020

*Nota.* Esta tabla ilustra los límites estadísticas condenatorias para la caja de velocidades en la flota granelera.

En la Tabla 33, se muestran límites de silicio, sodio y oxidación elevados en comparación con los criterios de la empresa y con valores de referencia reportados en (Valores límite para lubricantes, 2019). Ante esta situación, se realizó una revisión de los registros de intervención de la flota, sin evidenciar novedades relevantes distintas a los cambios de aceite o la limpieza de respiraderos. En consecuencia, dichas muestras fueron descartadas como indicios de falla.

En cuanto la viscosidad del mismo componente, se establecieron los siguientes límites:

**Tabla 34.**

*Limites condenatorios para la viscosidad de la transmisión*

<b>Limite</b>	<b>Verde-Amarillo</b>	<b>Amarillo-Rojo</b>
<b>Máximo</b>	19,4	19,7
<b>Mínimo</b>	13.3	13.1

*Nota.* Esta tabla muestra los limites estadísticos condenatorios en la viscosidad para la transmisión de la flota granelera.

Los límites presentados en la Tabla 34, cumplen con el máximo establecido en la norma SAE J306, descrita por (Total Energies, 2019). Sin embargo, los límites mínimos no cumplen la clasificación, lo cual podría atribuirse a las altas concentraciones de sodio detectadas en dichas muestras, evidenciadas en la Tabla 31.

#### **4.5 Sistema de monitoreo de las propiedades fisicoquímicas**

En primera instancia, se consolidó la base de datos proveniente de los dos laboratorios. Para ello, a cada laboratorio se le asignó un acceso directo a un archivo en Google Sheets con una estructura estandarizada, equivalente al formato tradicionalmente suministrado a la empresa.

El formato actualizado para el laboratorio encargado del análisis de motores se presenta en la siguiente figura:

Figura 36.

Base de datos del laboratorio 1

# Lube Quality Test	N° Interno o Placa (ID)	Ciudad	Sede	Fecha de toma de Muestra	¿Se realizó cambio de Aceite?	Volumen de relleno (qtts)	Servicio Aceite (Recorrido)	unidad	Servicio equipo	unidad	Equipo	Parte Lubricada	Fecha de reco
ISSA23-00001	XV0612	CALOTO	CAUCA	07/2023	NO	0 qtts)	27195	km.	962,051.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00002	WFC571	CALOTO	CAUCA	5/16/2023	NO	0 qtts)	11572	km.	918,172.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00003	WFD197	BUCARAMANGA	SANTANDER	5/12/2023	NO	0 qtts)	6062	km.	824,263.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00004	WFC576	CALOTO	CAUCA	5/17/2023	NO	0 qtts)	28081	km.	943,675.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00005	TAV204	CALOTO	CAUCA	6/7/2023	SI	0 qtts)	501	h(s)	31,587.00	h(s)	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00006	XVU729	CALOTO	CAUCA	6/15/2023	SI	0 qtts)	570	h(s)	38,074.00	h(s)	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00007	BACK02	CALOTO	CAUCA	6/7/2023	NO	0 qtts)	215	h(s)	10,512.00	h(s)	VOLVO	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00008	WFC574	CALOTO	CAUCA	6/17/2023	NO	0 qtts)	2648	km.	978,950.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00009	5X5139	CALOTO	CAUCA	5/24/2023	NO	0 qtts)	5706	km.	889,306.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00010	WFC546	CALOTO	CAUCA	6/20/2023	SI	0 qtts)	24305	km.	1,056,591.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00011	WFC608	BUCARAMANGA	SANTANDER	6/11/2023	SI	0 qtts)	40874	km.	1,043,715.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00012	WFD194	BUCARAMANGA	SANTANDER	6/19/2023	NO	0 qtts)	18256	km.	785,604.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00013	TAW355	BUCARAMANGA	SANTANDER	6/10/2023	NO	0 qtts)	8642	km.	1,115,463.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00014	WFC639	BUCARAMANGA	SANTANDER	6/7/2023	SI	0 qtts)	14364	km.	826,484.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00015	WFC549	BUCARAMANGA	SANTANDER	5/15/2023	SI	0 qtts)	46314	km.	1,283,155.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00016	TW563	BUCARAMANGA	SANTANDER	5/23/2023	NO	0 qtts)	17196	km.	763,867.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00017	TW524	BUCARAMANGA	SANTANDER	6/6/2023	SI	0 qtts)	38509	km.	784,284.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de
ISSA23-00018	GDU374	BUCARAMANGA	SANTANDER	6/6/2023	NO	0 qtts)	7760	km.	195,166.00	km.	CUMMINS	MOTOR	29 de junio de

Nota. Esta figura ilustra la base de datos que recopilará los análisis de las muestras de aceite en el motor.

En este formato se integraron los registros previamente reportados, lo que permitió garantizar la continuidad, trazabilidad y preservación de la información

De manera análoga, para el laboratorio responsable de la transmisión y los diferenciales se definió un esquema alternativo, representado en la Figura 37, el cual mantiene la misma lógica reportada en sus informes sobre las muestras analizadas.

Figura 37.

Base de datos del laboratorio 2

ID de Componente	ID Secundaria	Tipo de componente	Numero de laboratorio	Fecha de toma	Fecha Completado	Tiempo del componente	Tiempo del componente de unidad de la	Serie y Fluid (Producto) Nombre	Grado de líquido	Tiempo de líquido	tiempo de fluido unidad de medida	Hicero
TRAC03 H	CALOTO	HYDRAULIC	B-076562	20-oct-2022	03-nov-2022	5238 h		HYDRAULIC AV ISO 68		1018 h		47
TRAC03 E	CALOTO	DIESEL ENGINE	B-076546	20-oct-2022	03-nov-2022	5238 h		FORZA MAX SAE 15W40		82 h		7
TRAC03 H	CALOTO	HYDRAULIC	B-082787	21-nov-2022	22-Dic-2022	40663 h		HYDRAULIC AV ISO 68		1540 h		97
TRAC03 E	CALOTO	DIESEL ENGINE	B-082777	21-nov-2022	22-Dic-2022	10663 h		FORZA SAE 15W40		106 h		15
TRAC09 T		GEARBOX - MOBIL	B-147063	17-nov-2023	28-nov-2023	754 h		TRANSMISSION SAE 50		415 h		34
TRAC08 DIFF		DIFFERENTIAL	B-147081	10-nov-2023	28-nov-2023	13700 h		SYNCHRON SAE 85W140		448 h		482
GU0374 R DIFF		DIFFERENTIAL	B-146251	10-nov-2023	23-nov-2023	239364 km,		SYNCHRON SAE 85W140		19272 km,		47
GU0374 F DIFF		DIFFERENTIAL	B-146253	10-nov-2023	23-nov-2023	239364 km,		SYNCHRON SAE 85W140		19272 km,		31
TTW562 F DIFF		DIFFERENTIAL	B-132726	24-Aug-2023	20-Sep-2023	380467 h		SYNCHRON SAE 85W140		20369 h		1164
TTW463 F DIFF		DIFFERENTIAL	B-133089	16-Sep-2023	21-Sep-2023	415859 km,		SYNCHRON SAE 50		122005 km,		1305
TTW463 F DIFF		DIFFERENTIAL	B-132723	18-Aug-2023	20-Sep-2023	407206 km,		SYNCHRON SAE 50		113352 km,		1185
TTW463 T		GEARBOX - MOBIL	B-133085	16-Sep-2023	21-Sep-2023	415859 km,		TRANSMISSION SAE 50		122005 km,		6
TTW463 T		GEARBOX - MOBIL	B-132724	18-Aug-2023	20-Sep-2023	407206 km,		TRANSMISSION SAE 50		113352 km,		74
TTW562 T		GEARBOX - MOBIL	B-132722	11-Aug-2023	20-Sep-2023	377303 km,		TRANSMISSION SAE 50		116660 km,		182
TTW562 F DIFF		DIFFERENTIAL	B-140189	12-oct-2023	28-oct-2023	391358 h		SYNCHRON SAE 85W140		31240 h		2191
TTW562 F DIFF		DIFFERENTIAL	B-132738	11-Aug-2023	20-Sep-2023	377303 h		SYNCHRON SAE 85W140		17285 h		177
GQU373 T		GEARBOX - MOBIL	B-141561	19-oct-2023	31-oct-2023	207611 km,		TRANSMISSION SAE 50		12745 km,		194
GQU373 T		GEARBOX - MOBIL	B-132721	21-Jul-2023	20-Sep-2023	1301046 km,		TRANSMISSION SAE 50		17891 km,		205
WFC092 T	CALOTO	GEAR-TRANSMISS	B-129343	02-Aug-2023	07-Sep-2023	22623 h		TRANSMISSION SAE 50		1107 h		16
WFC092 T	CALOTO	GEAR-TRANSMISS	B-077895	31-oct-2022	17-nov-2022	21217 h		TRANSMISSION SAE 50		1569 h		87
TAV204 T		GEARBOX - MOBIL	B-141448	27-Sep-2023	30-oct-2023	32551 h		SYNCHRON SAE 50		3063 h		128
TAV204 T		GEARBOX - MOBIL	B-129346	02-Aug-2023	08-Sep-2023	32106 h		SYNCHRON SAE 50		2638 h		117
WFC099 T	BUCARAMANGA	DIFFERENTIAL	B-090409	18-Jan-2023	13-Feb-2023	894338 km,		TRANSMISSION SAE 50		75704 km,		36

Nota. Esta figura ilustra la base de datos que recopilará los análisis de las muestras de aceite de la transmisión y los diferenciales.

Una vez establecido el acceso directo para la alimentación de estas bases de datos, se conformó un único dataset que integró la información correspondiente a todos los componentes evaluados, cuya estructura final se presenta en la siguiente figura:

**Figura 38.**

*Base consolidad de las muestras analizadas*

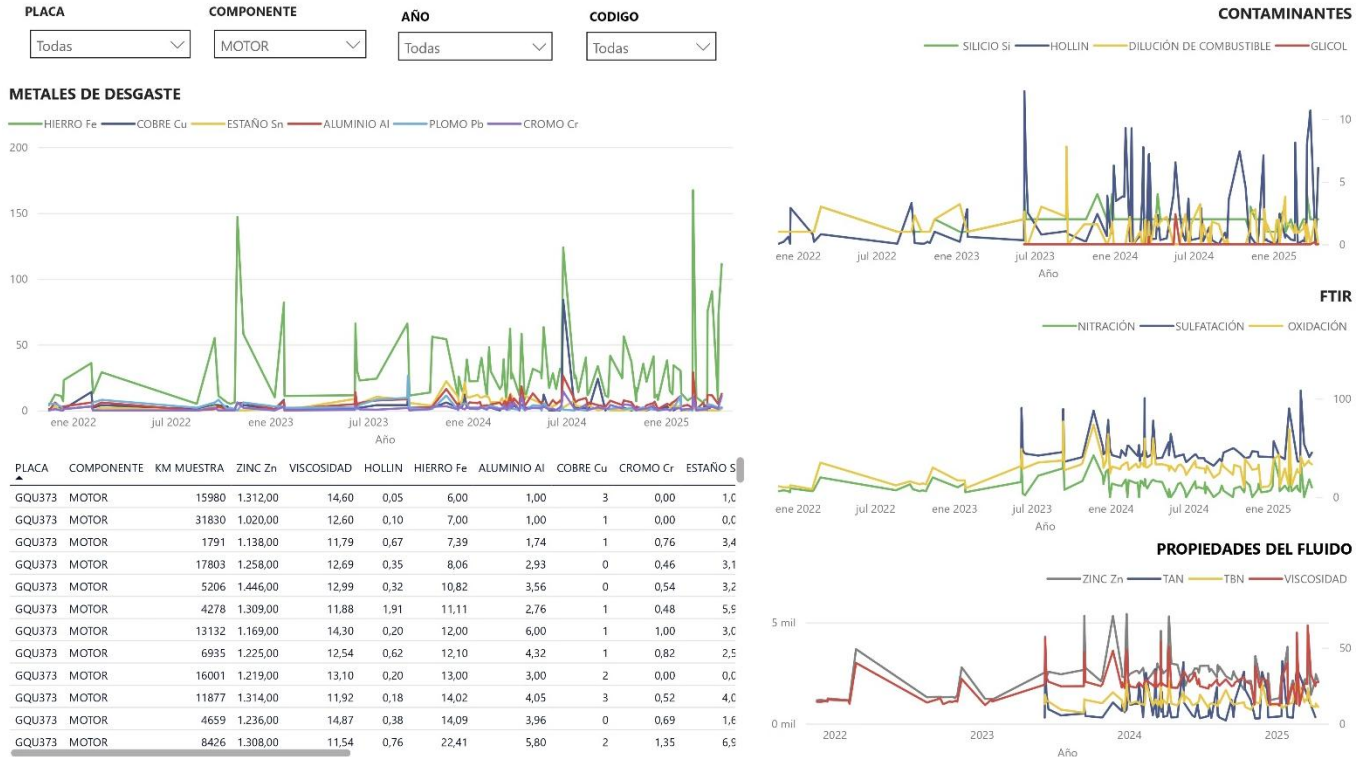
CODIGO	PLACA	MUESTRA	COMPONENTE	FECHA TOMA	FECHA DE RECEPCION	PLOMO Pb	COBRE Cu	ALUMINIO Al	CROMO Cr	ESTAÑO Sn
ISSA23-00001	XVU612	XVU612	MOTOR	6/7/2023	6/29/2023	0,36	1	3,47	1,39	2,41
ISSA23-00002	WFC571	WFC571	MOTOR	5/16/2023	6/29/2023	3	8	7,71	4,58	6,25
ISSA23-00003	WFD197	WFD197	MOTOR	5/12/2023	6/29/2023	0,09	0	2,46	0,88	3,48
ISSA23-00004	WFC576	WFC576	MOTOR	5/17/2023	6/29/2023	5,19	1	1,7	1,45	0,1
ISSA23-00005	TAV204	TAV204	MOTOR	6/7/2023	6/29/2023	1,17	0	1,33	0,14	2,41
ISSA23-00006	XVU729	XVU729	MOTOR	6/15/2023	6/29/2023	2,14	1	2,86	0,41	2,67
ISSA23-00007	BACK602	BACK602	MOTOR	6/7/2023	6/29/2023	0	6	4,24	0,53	3
ISSA23-00008	WFC574	WFC574	MOTOR	6/17/2023	6/29/2023	0,62	1	2,45	0,76	3,86
ISSA23-00009	SXS139	SXS139	MOTOR	5/24/2023	6/29/2023	0,46	0	1,88	0,35	3,48
ISSA23-00010	WFC546	WFC546	MOTOR	6/20/2023	6/29/2023	0,14	1	3,45	0,91	2,67
ISSA23-00011	WFC608	WFC608	MOTOR	6/11/2023	6/29/2023	1,75	12	13,7	8,58	3,35
ISSA23-00012	WFD194	WFD194	MOTOR	6/19/2023	6/29/2023	0,57	1	2,9	1,3	4,11
ISSA23-00013	TAW355	TAW355	MOTOR	6/19/2023	6/29/2023	0,48	1	2,02	1,14	2,15
ISSA23-00014	WFC639	WFC639	MOTOR	6/7/2023	6/29/2023	0,3	2	5,61	1,48	2,78
ISSA23-00015	WFC549	WFC549	MOTOR	5/15/2023	6/29/2023	10,21	1	3,02	2,48	3,04
ISSA23-00016	TTW563	TTW563	MOTOR	5/23/2023	6/29/2023	3,39	2	4,39	2,29	2,78
ISSA23-00017	TTW524	TTW524	MOTOR	6/6/2023	6/29/2023	3,74	2	3,7	0,78	3,94
ISSA23-00018	GZU374	GZU374	MOTOR	6/6/2023	6/29/2023	1,17	1	2,37	0,2	4,37
ISSA23-00019	TAW354	TAW354	MOTOR	6/22/2023	6/29/2023	2,41	3	7,31	2,6	1,53
ISSA23-00020	WFD197	WFD197	MOTOR	6/17/2023	6/29/2023	2,82	1	2,83	0,8	2,89
ISSA23-00021	TTW666	TTW666	MOTOR	6/27/2023	7/21/2023	6,39	2	4,76	0,8	5,05

*Nota.* Esta figura ilustra la estructura de la base de datos que almacenará las muestras de ambos laboratorios.

Esta base de datos constituye el insumo principal para la construcción de la herramienta de seguimiento, garantizando la trazabilidad de las muestras de todas las flotas monitoreadas. Con el fin de disponer de un mecanismo de seguimiento e interacción ágil con los registros, se optó por implementar un tablero de control en Power BI, el cual se conecta directamente con el archivo en Google Sheets que opera como base de datos central (Figura 15). Esta integración asegura la actualización automática en tiempo real de las propiedades del fluido. La interfaz desarrollada se presenta a continuación:

**Figura 39.**

*Interfaz seguimiento de las propiedades del lubricante*



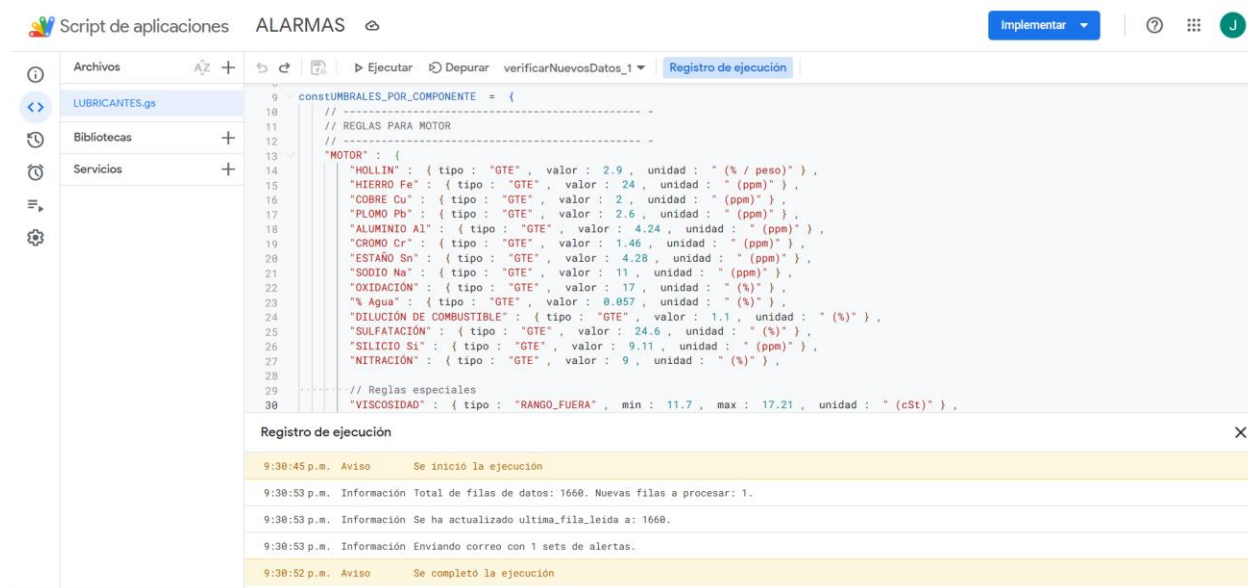
*Nota.* Esta figura ilustra la interfaz empleada para la visualización de las propiedades fisicoquímicas de los análisis del aceite lubricante utilizado para los componentes.

En esta interfaz se caracterizó el seguimiento mediante la clasificación de propiedades: (i) metales de desgaste, (ii) propiedades calculadas por espectroscopía FTIR, (iii) parámetros que permiten evaluar las condiciones del lubricante como el contenido de aditivos o su capacidad de neutralizar ácidos en el caso del motor, y la acidez en transmisión y diferenciales; y tales como sílice, dilución de combustible, refrigerante o productos derivados de la combustión. Asimismo, el tablero incorpora filtros que permiten al usuario realizar consultas específicas según el nivel de análisis requerido: selección por componente, placa vehicular, muestra puntual mediante su código de identificación, o filtrado temporal por año. Estas funcionalidades facilitan un análisis focalizado y dinámico de la condición de los lubricantes en la flota vehicular.

De manera complementaria, se desarrolló un sistema de alarmas mediante Google Apps Script (Figura 40), el cual integró un algoritmo programado que recorre periódicamente el consolidado de muestras a través de un disparador (trigger). Este algoritmo compara los valores registrados con los umbrales previamente definidos en el nivel de alerta y en la zona Amarillo-Rojo, clasificando el estado de cada variable. Además, en la fase inicial registra la totalidad de los valores existentes, estableciendo un mecanismo cíclico de seguimiento que permite detectar de manera automática cualquier registro adicional incorporado desde la ejecución previa.

**Figura 40.**

### Interfaz App Script



The screenshot shows the Google Apps Script editor interface. The main window displays a JavaScript script for monitoring lubricant limits. The script defines a constant array of thresholds for various components and a function to process data. The log window at the bottom shows the execution history.

```
constUMBRALES_POR_COMPONENTE = {
  // -----
  // REGLAS PARA MOTOR
  // -----
  "MOTOR": {
    "MOLIN": { tipo: "GTE", valor: 2.9, unidad: "(% / peso)" },
    "HIERRO Fe": { tipo: "GTE", valor: 24, unidad: "(ppm)" },
    "COBRE Cu": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: "(ppm)" },
    "PLOMO Pb": { tipo: "GTE", valor: 2.6, unidad: "(ppm)" },
    "ALUMINIO Al": { tipo: "GTE", valor: 4.24, unidad: "(ppm)" },
    "CROMO Cr": { tipo: "GTE", valor: 1.46, unidad: "(ppm)" },
    "ESTAÑO Sn": { tipo: "GTE", valor: 4.28, unidad: "(ppm)" },
    "SODIO Na": { tipo: "GTE", valor: 11, unidad: "(ppm)" },
    "OXIDACION": { tipo: "GTE", valor: 17, unidad: "(%)" },
    "% Agua": { tipo: "GTE", valor: 0.857, unidad: "(%)" },
    "DILUCION DE COMBUSTIBLE": { tipo: "GTE", valor: 1.1, unidad: "(%)" },
    "SULFATACION": { tipo: "GTE", valor: 24.6, unidad: "(%)" },
    "SILICIO Si": { tipo: "GTE", valor: 9.11, unidad: "(ppm)" },
    "NITRACION": { tipo: "GTE", valor: 9, unidad: "(%)" },
    // Reglas especiales
    "VISCOSIDAD": { tipo: "RANGO_FUERA", min: 11.7, max: 17.21, unidad: "(cSt)" },
  }
}
```

**Registro de ejecución**

- 9:30:45 p.m. Aviso Se inició la ejecución
- 9:30:53 p.m. Información Total de filas de datos: 1660. Nuevas filas a procesar: 1.
- 9:30:53 p.m. Información Se ha actualizado ultima\_fila\_leida a: 1660.
- 9:30:53 p.m. Información Enviando correo con 1 sets de alertas.
- 9:30:52 p.m. Aviso Se completó la ejecución

*Nota.* Esta figura visualiza la interfaz usada para la creación de alarmas con respecto a los límites establecidos.

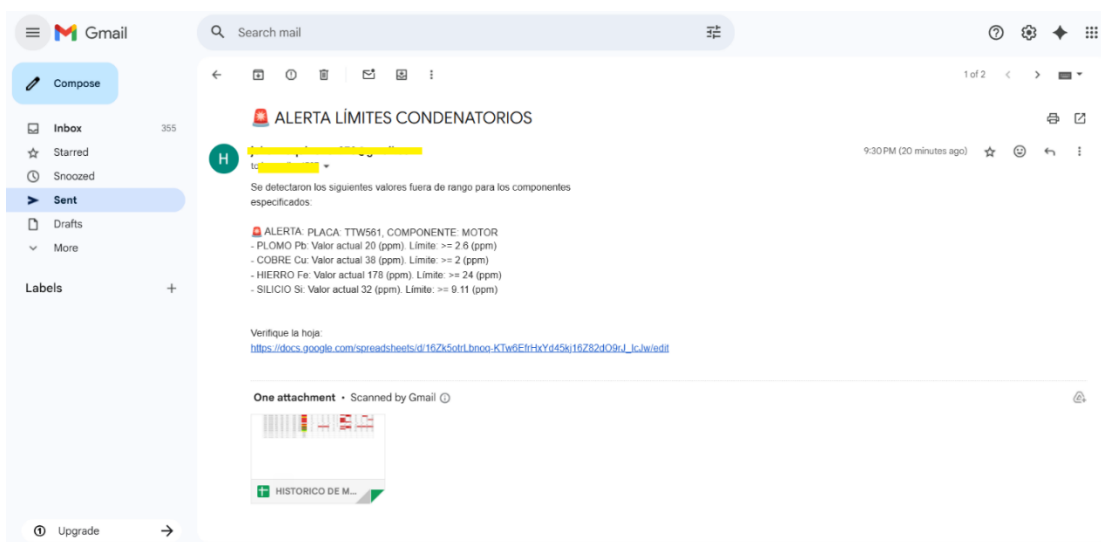
La Figura 42 muestra la ejecución del algoritmo con la incorporación de nuevos valores que exceden los umbrales establecidos. En estos casos, los valores se clasifican como condiciones de alerta, lo que desencadena de manera automática la generación de una notificación consolidada,

la cual se envía directamente al planeador del área de mantenimiento automotriz, permitiendo un seguimiento inmediato de las muestras críticas.

La alerta correspondiente al estado de los equipos se genera a través de Gmail, como se observa a continuación:

### Figura 41.

#### *Gmail de alerta*



*Nota.* La figura ilustra como se presenta la alerta al encargado de la planeación en el área de mantenimiento automotriz.

La figura muestra un correo de alerta enviado automáticamente al encargado, en el que se reporta la muestra que excedió los límites preestablecidos, indicando la placa, el componente afectado y las propiedades cuyos valores sobrepasaron los umbrales de alerta, junto con los datos necesarios para verificar la muestra en la base de datos.

## 5. Conclusiones

La identificación de la flota vehicular crítica se realizó con un enfoque jerárquico integral, considerando factores operativos, económicos y de desempeño. Este análisis permitió optimizar la planificación del mantenimiento y la asignación de recursos, fortaleciendo la confiabilidad y sostenibilidad de la organización.

La ejecución de la metodología para la flota crítica se implementó con un alto nivel de rigurosidad, siguiendo todos los lineamientos y recomendaciones para la generación de límites tentativos mediante la aplicación de pruebas estadísticas y el tratamiento sistemático de la base de datos, evitando resultados arbitrarios o sesgados. Además, proporciona un marco metodológico replicable que fortalece el programa de monitoreo de aceites lubricantes, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia, optimizando la gestión del mantenimiento de los activos y promoviendo el desarrollo de modelos de aprendizaje automático para la mejora continua del programa.

El análisis de la evolución de las propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes, en función de los regímenes de operación de la flota, evidenció que la degradación del lubricante y el desgaste de los componentes no están determinados por la antigüedad de los vehículos, sino por las condiciones operativas específicas. En los vehículos que operan por horas, aun equipados con sistemas de recirculación de gases de escape, los parámetros de lubricación y el estado del motor se mantienen dentro de rangos óptimos, reflejando un patrón de degradación compatible con la vida útil prevista del aceite. En contraste, los vehículos operados por kilómetros presentan indicadores de desgaste acelerado en sus componentes y una degradación prematura del lubricante entre cambios programados, evidenciando la influencia del tipo de operación sobre la longevidad del aceite y la confiabilidad mecánica.

El establecimiento de límites estadísticos de alarma se fundamentó en la distribución acumulativa de la condición real de operación de la flota estudiada, adoptando la definición de umbrales conservadores ante la posible condición de falla reflejada en los ciclos de nivelación a los que ha estado expuesto el motor, y en el historial previo de fallas registradas caracterizado por concentraciones elevadas de contaminación y desgaste. Por otro lado, los límites de la transmisión y los diferenciales se vieron afectados por la persistente presencia de silicio que generó un desgaste abrasivo constante, y estableció umbrales ligeramente elevados que, si bien podrían no permitir anticipar de manera inmediata una falla, facilitarían la implementación de estrategias preventivas orientadas a la conservación de los componentes y a dirigir su desempeño hacia condiciones operativas más óptimas.

La implementación de una interfaz dinámica, acompañada de un sistema de alertas en tiempo real, permitió homogenizar la teoría de lubricantes con la práctica en el campo, facilitando la supervisión y priorización de los componentes que requieren intervención oportuna. Por otro lado, el sistema se diseñó para alertar al personal cuando se superan los límites establecidos, considerando las propiedades afectadas por modos de falla recurrentes y evitando así posibles alertas tardías por lo que se ajustó su codificación para asegurar una activación temprana y una gestión preventiva más efectiva.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda reaplicar la metodología validada en este estudio para garantizar un monitoreo basado en condición, evitando que los umbrales se vuelvan obsoletos o generen falsas alarmas. Asimismo, se sugiere realizar un seguimiento detallado de las propiedades críticas según cada componente, con el fin de evitar omisiones y mejorar la trazabilidad del aceite.

Se recomienda ajustar el intervalo de cambio de aceite para las unidades operadas por kilómetros, realizando un seguimiento en aquellas que se encuentran en condiciones de operación normales, sin indicios de falla. Este monitoreo se llevaría a cabo mediante la toma de dos muestras intermedias entre cambios de aceite, con el fin de evaluar la evolución de las propiedades del lubricante y su degradación, considerando parámetros críticos con el objetivo de optimizar la gestión predictiva del lubricante y garantizar la confiabilidad mecánica de los componentes.

Se recomienda considerar la extensión de los intervalos de cambio de aceite en las unidades graneleras operadas por horas, dado que los análisis realizados evidenciaron que los lubricantes mantenían buenas condiciones dentro de los ciclos de cambio. Esta medida permitiría aprovechar de manera más eficiente la vida útil del aceite y reducir costos operativos. No obstante, se debe implementar un programa de monitoreo continuo, apoyado en análisis periódicos del lubricante, para garantizar que la extensión de los intervalos no comprometa la integridad de los equipos y asegure un desempeño óptimo.

Se recomienda implementar un programa de inspección específico para los vehículos de régimen de operación por kilómetros debido a la presencia recurrente de altas concentraciones de hollín, dilución de combustible y degradación acelerada del aceite lubricante, condiciones que comprometen la vida útil del motor y la confiabilidad operativa de la flota. Dentro de este programa, se incluye la realización de videoscopía de las camisas de los cilindros, con el fin de

evaluar el estado del bruñido interno y detectar desgaste irregular o daños que puedan favorecer el barrido de combustible hacia el cárter. Adicionalmente, se sugiere ejecutar la prueba de blow-by para cuantificar el ingreso de gases de combustión al cárter, lo cual permite identificar posibles fugas por segmentos o anillos de pistón desgastados. Asimismo, se recomienda inspeccionar el estado del enfriador de aceite y realizar pruebas de fugas de presión en el sistema de refrigeración con el fin de evitar la contaminación cruzada entre fluidos, y garantizar la integridad mecánica de los componentes.

Se recomienda efectuar un análisis detallado del combustible con el fin de determinar su concentración de azufre, considerando que las unidades presentan elevados niveles de sulfatación, condición que favorece la degradación acelerada del aceite lubricante y propicia un incremento en la acidez, lo que a su vez incrementa significativamente la susceptibilidad de los componentes internos del motor a la corrosión y al desgaste prematuro, comprometiendo la confiabilidad y la vida útil del sistema de lubricación

Se recomienda efectuar un refrescamiento de aditivos en el caso en el que el aceite presente degradación prematura en condiciones de bajo servicio operativo, con el fin de restaurar sus propiedades funcionales.

### Referencias

- Eduardo, P. A. (2022a, noviembre 9). *Diseño y construcción de un viscosímetro digital por comparación para el estudio del comportamiento de la viscosidad cinemática de aceites lubricantes*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12064>
- ASTM INTERNATIONAL. (2017). *Standard Guide for Statistically Evaluating Measurand Alarm Limits when Using Oil Analysis to Monitor Equipment and Oil for Fitness and Contamination*. Obtenido de [file:///C:/Users/USUARIO/Documents/LIBRO%20PROYECTO%20DE%20GRADO/toaz.info-astm-d7720pdf-pr\\_b33fe85e175d56f1d69113e50620771c%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Documents/LIBRO%20PROYECTO%20DE%20GRADO/toaz.info-astm-d7720pdf-pr_b33fe85e175d56f1d69113e50620771c%20(1).pdf)
- Buuren, S. v. (2022). *Imputación flexible de datos faltantes*. CRC Press. Obtenido de <https://stefvanbuuren.name/fimd/sec-MCAR.html>
- Calafati, R. O. (06 de Junio de 2017). *Estrategias para el tratamiento de datos faltantes ("missing data") en estudios con datos longitudinales*. España: Universidad Abierta de Cataluña. Obtenido de <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/e1c16dfd-5082-48fd-866b-1f7dc7959b9b/content>
- castillo, J. (2 de 11 de 2024). Motores Cummins.
- castillo, J. (15 de 02 de 2025). PRESUPUESTO DEL AÑO 2024. (J. C. Merchan, Entrevistador)
- castrol, L. (21 de 12 de 2023). *Oxidación del lubricante: qué es, cómo afecta y mantenimiento preventivo*. Castrol. <https://lubricantesdistribuidor.com/blog/post/oxidacion-lubricantes-mantenimiento-preventivo.html#:~:text=Todo%20esto%2C%20en%20conjunto%2C%20puede,del%20d esgaste%20de%20los%20lubricantes>.

Codificando Bits. (2021, 18 junio). *¿Cómo manejar los DATOS FALTANTES?: guía completa*

[Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ARwHkq4t2q0>

Cummins. (06 de 09 de 2021). *Presencia de aluminio en el análisis de aceite de su motor.* (s. f.-

b). Héroes del Timón. <https://www.heroesdeltimon.com/es/presencia-de-aluminio-en-el-analisis-de-aceite-de-su-motor>

D7720-21, A. (14 de octubre de 2021). Standard Guide for Statistically Evaluating Measurand

Alarm Limits when Using Oil Analysis to Monitor Equipment and Oil for Fitness and Contamination. (s. f.-c). <https://store.astm.org/d7720-21.html>

RPUBs - Pruebas de normalidad. (s. f.). [https://rpubs.com/dvillasanao/Pruebas\\_de\\_Normalidad](https://rpubs.com/dvillasanao/Pruebas_de_Normalidad)

Emission Standards: USA: Heavy-Duty onroad engines. (s. f.).

<https://dieselnet.com/standards/us/hd.php#y2007>

Fractal. (2024). *Mantenimiento Predictivo: El arte de anticiparte a las fallas.*

<https://www.fractal.com/es/guias-mantenimiento/mantenimiento-predictivo>

GeeksforGeeks. (2025, 3 noviembre). *Handling Missing Data with IterativeImputer in Scikitlearn.*

GeeksforGeeks. <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/handling-missing-data-with-iterativeimputer-in-scikit-learn/>

Godoy, J. A. (2022). *RPubs - Manejo de datos faltantes.* (s. f.).

[https://rpubs.com/JairoAyala/Missing\\_data](https://rpubs.com/JairoAyala/Missing_data)

Helsel, D. R. (2018). Frontmatter. En *STATISTICS FOR CENSORED ENVIRONMENTAL DATA*

*USING MINITAB AND R* (pp. i-xix). <https://doi.org/10.1002/9781118162729.fmatter>

Infomante por soporte y compañía. (2022). *Evaluación de la criticidad de los activos.*

<https://soporteycia.com/sites/default/files/sop-boletin-10-criticidad-18-jun-2021.pdf>

Informatica. (s. f.). *What is data engineering?*

<https://www.informatica.com/resources/articles/what-is-data-engineering.html>

James Castillo, J. N. (Febrero de 2025). Flota Granelera. (J. C. Merchan, Entrevistador)

Learn Statistics Easily. (2025, 27 julio). *What is: Fligner-Killeen Test - A Statistical Overview.*

LEARN STATISTICS EASILY. <https://statisticseasily.com/glossario/what-is-fligner-killeen-test-statistical-overview/>

Rosa, G. L. M. (2025, 25 febrero). *Evaluación del impacto del análisis de muestras de aceite en motores diésel sobre la operación y reducción de costos en los sectores de construcción y cemento: Clientes de Dozermaq.* <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/45346>

Shell. (s. f.). *Guía Shell de lubricantes* [PDF]. Punto Industrial. Recuperado de [https://www.puntoindustrial.cl/img/lubricantes/catalogos-shell/guia\\_shell\\_lubricantes-interactivo.pdf](https://www.puntoindustrial.cl/img/lubricantes/catalogos-shell/guia_shell_lubricantes-interactivo.pdf)

Luis, B.-C., & Vicente, G.-G. (2024, agosto 15). Detección temprana de fallas en motores de combustión interna a diésel mediante la técnica de análisis de aceite [PDF]. Dialnet. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5269483.pdf>

Mack, C., Su, Z., & Westreich, D. (2018, 1 febrero). Types of Missing Data. Managing Missing Data In Patient Registries - NCBI Bookshelf. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493614/>

Mancipe, I. y. L. (2019, 23 octubre). Huevos Kikes, una marca verde y sostenible. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/contenido-comercial/huevos-kikes-una-marca-verde-y-sostenible-425384>

- Noria Latín América. (2024, noviembre 7). El análisis de aceite explicado [Artículo web]. Recuperado de <https://noria.mx/lube-learn/lubricacion-maquinaria-lube-learn/certificacion-mlti/el-analisis-de-aceite-explicado/>
- Noria Latín América. (2024, enero 22). El cobre y los aceites de motor a diésel. Recuperado de <https://noria.mx/lube-learn/lubricacion-maquinaria-lube-learn/certificacion-mlti/el-cobre-y-los-aceites-de-motor-a-diesel/>
- Noria Latín América. (2022, mayo 9). Las mejores pruebas para detectar la dilución por combustible. Recuperado de <https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/las-mejores-pruebas-para-detectar-la-dilucion-por-combustible/>
- Noria Latín América. (2024, julio 15). Pruebas del análisis de aceite – Definiciones. Recuperado de <https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/pruebas-del-analisis-de-aceite-definiciones/>
- Noria Latín América. (2024, julio 15). Pruebas del análisis de aceite – Definiciones. Recuperado de <https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/pruebas-del-analisis-de-aceite-definiciones/>
- RPubs - Prueba de Wilcoxon. (s. f.). <https://rpubs.com/luisrmacias/wilcoxon>
- Riaño, D. D. M. (2025, 23 mayo). *Cómo implementar un sistema de criticidad ABC para equipos productivos: Una herramienta clave en la gestión de activos.* <https://www.linkedin.com/pulse/c%C3%B3mo-implementar-un-sistema-de-criticidad-abc-para-una-may-ria%C3%B1o-kkffe/>
- McLeod, S., PhD. (2025). Understanding P-Values and Statistical Significance. Simply Psychology. <https://www.simplypsychology.org/pvalue.html#:~:text=%C2%BFQu%C3%>

A9%20significa%20un%20valor%20p%20de%200%2C05?,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20esto?

Silva, J. E. (2024, 7 marzo). *linkedin*. ¿Cómo pueden los árboles de decisión mejorar el análisis de regresión?. <https://www.linkedin.com/advice/1/how-can-decision-trees-improve-regression-analysis-bbfsf?lang=es&lang=es&originalSubdomain=es>

Guía completa para el Manejo de Datos Faltantes | Codificando Bits. (2024, 21 febrero). Codificando Bits. <https://codificandobits.com/blog/guia-manejo-datos-faltantes/>

Fiix. (2025, 17 junio). *What is six sigma? I six sigma in maintenance i fiix*. <https://fiixsoftware.com/glossary/six-sigma>

TotalEnergies. (2019, 5 marzo). Así es la SAE de los aceites de caja de cambios. TotalEnergies Blog: Expertos En Lubricantes Para Tu Motor. <https://blog.totalenergies.es/sae-caja-de-cambios>

Heymans, M. W., & Twisk, J. W. (2022). Handling missing data in clinical research. *Journal Of Clinical Epidemiology*, 151, 185-188. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2022.08.016>

Van Buuren, S. (2018). *Flexible Imputation of Missing Data (2nd ed.)*. CRC Press. <https://stefvanbuuren.name/fimd/>

Wbeimar Cabrera Leyton. (2024). *Limites Condenatorios para aceites usado*. <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Limites%20Condentarios%20Aceites%20Usados.pdf>

WordPress.(2012, 10 diciembre). Six Sigma para mejores operaciones de TI y satisfacción del cliente. Gestion de la Calidad. <https://gestiondecalidad.home.blog/2018/12/09/six-sigma-para-mejores-operaciones-de-ti-y-satisfaccion-del-cliente/>

Ydata. (2024, 17 junio). Understanding Missing Data Mechanisms: Types and Implications. YDaa.

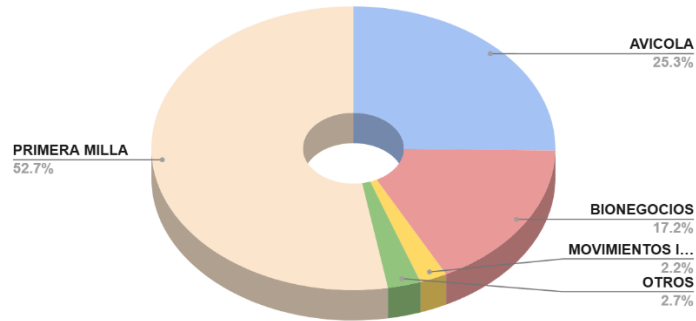
Recuperado 27 de julio de 2023, de <https://ydata.ai/resources/understanding-missing-data-mechanisms.html#:~:text=MCAR:%20Desaparecido%20completamente%20al%20azar,s on%20generalmente%20imparciales%20y%20confiables>.

Zuñiga, P. J. (2020). Estudio de rendimiento de lubricantes en compañías constructoras, impacto economico y alternativas ecologicas para el uso de aceite usado [Tesis de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/93677/D-28452.pdf>

Apéndice

Apéndice A.

Proporción de costos de mantenimiento por operación



Apéndice B

Análisis de muestras virgen

COMPONENTE	HOLLIN	HIERRO Fe	COBRE Cu	PLOMO Pb	ALUMINIO Al	CROMO Cr	ESTAÑO Sn	ZINC Zn	SILICIO Si
MOTOR	0	0.76	0	0.44	0.99	0.2	0	1150	0.45
DIFERENCIAL		1	0	0	0	0	0	1	6

COMPONENTE	VISCOSIDAD	SODIO Na	OXIDACIÓN	DILUCIÓN DE COMBUSTIBLE	Viscosidad 40°C	% Agua	TBN	NITRACIÓN	SULFATACIÓN	GLICOL
MOTOR	14.39	2.52	11.8	0.1	108.65	0.0198	11	0.35	17.2	0
DIFERENCIAL	24.80	3	3			0	No aplica	3	No aplica	No aplica

Apéndice C.

Plan de mantenimiento de la flota granelera

EQUIPO	PLAN_MITTO	REGIMEN	PARTE	ACTIVIDAD_MITTO	FRECUENCIA	UNIDAD	FREC_FECHAS	PERIODO
TTW562	4300 (TTW562)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
TTW562	4300 (TTW562)	Mixto	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	10000	KM	2	mes(es)
TTW562	4300 (TTW562)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	180000	KM	24	mes(es)
WFC639	7800 (WFC639)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
WFC639	7800 (WFC639)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
WFC639	7800 (WFC639)	Mixto	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	10000	KM	2	mes(es)
WFC639	7800 (WFC639)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	180000	KM	24	mes(es)
XVU729	7600 2015 (HR) (XVU729)	Lecturas	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	500	HR	0	
XVU729	7600 2015 (HR) (XVU729)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
XVU729	7600 2015 (HR) (XVU729)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
XVU729	7600 2015 (HR) (XVU729)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	3000	HR	24	mes(es)
XV650	7600 2009 (HR) (XV650)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
XV650	7600 2009 (HR) (XV650)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
XV650	7600 2009 (HR) (XV650)	Mixto	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	500	HR	4	mes(es)
XV650	7600 2009 (HR) (XV650)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	3000	HR	24	mes(es)
TAV204	T800 (HR) (TAV204)	Lecturas	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	500	HR		
TAV204	T800 (HR) (TAV204)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
TAV204	T800 (HR) (TAV204)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
TAV204	T800 (HR) (TAV204)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	3000	HR	24	mes(es)
TAX328	7600 2015 (HR) (TAX328)	Lecturas	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	500	HR	0	
TAX328	7600 2015 (HR) (TAX328)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
TAX328	7600 2015 (HR) (TAX328)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	2000	HR	15	mes(es)
TAX328	7600 2015 (HR) (TAX328)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	3000	HR	24	mes(es)
TTW666	7600 2017 (TTW666)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
TTW666	7600 2017 (TTW666)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
TTW666	7600 2017 (TTW666)	Mixto	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	10000	KM	2	mes(es)
TTW666	7600 2017 (TTW666)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	180000	KM	24	mes(es)
TAW355	7600 2012 (TAW355)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
TAW355	7600 2012 (TAW355)	Mixto	\ DIFERENCIAL	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
TAW355	7600 2012 (TAW355)	Mixto	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	10000	KM	2	mes(es)
TAW355	7600 2012 (TAW355)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	180000	KM	24	mes(es)
GQU374	T800 2020 (GQU374)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
GQU374	T800 2020 (GQU374)	Mixto	\ DIFERENCIALES	CAMBIAR ACEITE Y FILTRO DE DIFERENCIALES (85W140)	120000	KM	15	mes(es)
GQU374	T800 2020 (GQU374)	Mixto	\ MOTOR	CAMBIAR ACEITE MOTOR	10000	KM	2	mes(es)
GQU374	T800 2020 (GQU374)	Mixto	\ TRANSMISION	CAMBIAR ACEITE TRANSMISION-CAJA VEL (SINTETICO)	180000	KM	24	mes(es)

**Apéndice D.***Codificación en Rstudio*

```

df_actualizado<-NUEVA_DATA_RSTUDIO
dim(df_actualizado)
str(df_actualizado)
#cuantifica los NA
# Lista de valores que quieres considerar como NA
valores_na <- c(" ", "", "N/A", "NA", "-", "None", "Null", "#N/A", "#DIV/0!",
               "ND", "NR", "No aplica", "no aplica", "NO APLICA", "WAT")

df_actualizado[] <- lapply(df_actualizado, function(col) {
  col <- as.character(col)
  col[col %in% valores_na] <- NA
  return(col)
})

na_por_columna <- colSums(is.na(df_actualizado[ , !(names(df_actualizado) %in% "Visc
print(na_por_columna)
str(df_actualizado)
#grafico patron

install.packages("VIM")
library(VIM)
df_na <- df_actualizado[, colSums(is.na(df_actualizado)) > 0]
df_na_filtrado <- df_na[, names(df_na) != "Viscosidad 40°C"]
aggr(df_na_filtrado, sortVars = TRUE,
     labels = names(df_na_filtrado), cex.axis = .65, font.axis = 1, gap = 1, las = 2,
     ylab = c("Proporcion de faltantes", "Combinaciones"), oma = c(10, 4, 6, 2), ylim

#Las propiedades con mayor porcentaje de NA
#colMeans(is.na(df_na_filtrado))

#install.packages("naniar")
#library(naniar)
#vis_miss(df)

#install.packages("mice")
#library(mice)
#md.pattern(df_num)

```

## Apéndice E.

### Regla Tukey en R

```

df_num <- df[, sapply(df, is.numeric)]

# Media y mediana
mean(df$HOLLIN, na.rm = TRUE)
df$HOLLIN
medias <- sapply(df_num, mean, na.rm = TRUE)
medianas <- sapply(df_num, median, na.rm = TRUE)
q1 <- sapply(df_num, function(x) quantile(x, probs = 0.25, na.rm = TRUE))
q3 <- sapply(df_num, function(x) quantile(x, probs = 0.75, na.rm = TRUE))
iqr <- sapply(df_num, function(x) IQR(x, na.rm = TRUE))

# Organizar resultados
resultados <- data.frame(
  Propiedad = names(df_num),
  Media = medias,
  Mediana = medianas,
  Minimo = sapply(df_num, function(x) min(x, na.rm = TRUE)),
  Maximo = sapply(df_num, function(x) max(x, na.rm = TRUE)),
  Rango = sapply(df_num, function(x) max(x, na.rm = TRUE) - min(x, na.rm = TRUE)),
  Q1 = q1,
  Q3 = q3,
  IQR = iqr
)

# Mostrar tabla
print(resultados)
library(openxlsx)
write.xlsx(resultados, "MEDIANA_MEDIA_SIN_IMPUTACIÓN_completo.xlsx", rowNames = FALSE)

resumen_2<- data.frame(
  Propiedad = names(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN),
  Media = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) mean(x, na.rm = TRUE) else NA),
  Mediana = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) median(x, na.rm = TRUE) else NA),
  Min = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) min(x, na.rm = TRUE) else NA),
  Max = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) max(x, na.rm = TRUE) else NA),
  Rango = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) diff(range(x, na.rm = TRUE)) else NA),
  Q1 = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) quantile(x, 0.25, na.rm = TRUE) else NA),
  Q2 = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) quantile(x, 0.50, na.rm = TRUE) else NA),
  Q3 = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) quantile(x, 0.75, na.rm = TRUE) else NA),
  IQR = sapply(PRUEBA_MOTORES_SINMISSGIN, function(x) if(is.numeric(x)) IQR(x, na.rm = TRUE) else NA)
)

```

## Apéndice F.

### Codificación de tratamiento e imputación

```

import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

```

```

# Leer archivo Excel
df = pd.read_excel('PRUEBA_LAB2.xlsx', na_values=[' ', '', 'N/A', 'NA', '-',
'None', 'Null', '#N/A', '#DIV/0!', 'ND', 'NR', 'No aplica', 'no aplica', 'NO
APLICA', 'WAT'])
#print(df.head()) #muestra las primera 5 lineas
print(df.tail(10)) #Muestra las últimas 10 filas del DataFrame
#conversion de datos para valores <>

def valores_especiales(valor):
    if isinstance(valor, str) :
        if valor.startswith('<') :
            try:
                Valor_1 = valor[1:].replace( '<', '' )
                Numero_1= Valor_1.replace(',', '.')
                Numero = float(Numero_1)
                return Numero/2
            except ValueError:
                return valor
        return valor
df_valor=df.applymap(valores_especiales)
# df_valor.to_excel('NUEVA_DATA.xlsx' , index= False)

print("TABLA DE TIPO DE DATOS CAMBIADO")
print(df_valor.dtypes)

# identificar caracteres no numericos en columnas
for col in df_valor.columns:
    for i, valor in df_valor[col].items():
        if not isinstance (valor, (int, float)) :
            print (f"fila {i}, columna {col} : valor -> '{valor}'")

# Identificar datos faltantes iniciales
missing_initial = df.isnull().sum()
print("valores iniciales faltantes")
print(missing_initial)

# Visualizar datos faltantes
sns.heatmap(df.isnull(), cbar=False , cmap="Reds")
plt.title('VALORES ANTES DE IMPUTAR')
plt.show()

# IDENTIFICADOR PARA HACER UNA IMPUTACIÓN MULTIVARIABLE

```

```

df_valor['id_equipo'] = df_valor['PLACA'].astype(str) + " - " +
df_valor['COMPONENTE'].astype(str)
todos_los_id_equipo_unicos = df_valor['id_equipo'].unique()
print(f"Total de grupos de 'id_equipo' únicos:
{len(todos_los_id_equipo_unicos)}")
if len(todos_los_id_equipo_unicos) > 0:
    print("Lista de todos los 'id_equipo' únicos:")
    for equipo_id in todos_los_id_equipo_unicos:
        print(f"- {equipo_id}")
else:
    print("No se encontraron 'id_equipo' únicos en el DataFrame.")

conteo = df_valor['id_equipo'].value_counts()
# SE VA A IMPUTAR PARA PLACAS QUE TENGAN 3 O MÁS MUESTRAS
ids_validos = conteo[conteo >= 3].index
df_filtrado_original = df_valor[df_valor['id_equipo'].isin(ids_validos)].copy() #
data copia nueva de mas de 3 muestras; copia para evitar el
SettingWithCopyWarning
print("TIPO DE DATO DEL DATAFRAME USADO")
print(df_filtrado_original.dtypes)
from sklearn.experimental import enable_iterative_imputer
from sklearn.impute import IterativeImputer #IMPUTACION MULTIVARIABLE POR
REGRESION
from sklearn.ensemble import ExtraTreesRegressor
from sklearn.preprocessing import StandardScaler

# RandomForestRegressor

# Lista para almacenar los DataFrames de los grupos imputados
lista_df_imputados = []
grupos_imputados = 0
grupos_no_imputados = 0
lista_no_imputados = []

#BUCLE PRINCIPAL
for ideq in ids_validos: #PARA CADA ID, EN LA DATA VALIDA (>= 3)
    # Usar el df_filtrado_original para extraer de cada id_equipo y hacerlo por
grupo.
    grupo = df_filtrado_original[df_filtrado_original['id_equipo'] ==
ideq].copy() #filtro en donde mi id_equipo es igual al de la data filtrado
original. Correlacion entre datas.
    componente = grupo['COMPONENTE'].iloc[0]

```

```

    columnas_numericas_en_grupo_original =
grupo.select_dtypes(include=np.number).columns.tolist()
    grupo_num = grupo[columnas_numericas_en_grupo_original].copy()
    columnas_a_excluir_en_esta_iteracion = []
    # EXCLUIR COLUMNAS
    # Excluir columnas específicas para ciertos componentes
    if componente in ['DIFERENCIAL FRONTAL', 'DIFERENCIAL TRASERO',
'TRANSMISIÓN', 'DIFERENCIAL']:
        columnas_a_excluir_en_esta_iteracion = ['HOLLIN', 'DILUCIÓN DE
COMBUSTIBLE', 'Viscosidad 40°C', 'TBN', 'SULFATACIÓN', 'GLICOL', 'TAN']
    elif componente == 'HIDRÁULICO':
        columnas_a_excluir_en_esta_iteracion = ['HOLLIN', 'DILUCIÓN DE
COMBUSTIBLE', 'TBN', 'GLICOL', 'SULFATACIÓN', 'TAN']
    elif componente == 'MOTOR':
        columnas_a_excluir_en_esta_iteracion = ['Viscosidad 40°C']

    # Asegurar que las columnas a excluir existan en grupo_num
    columnas_a_excluir_final = [col for col in
columnas_a_excluir_en_esta_iteracion if col in grupo_num.columns]

    #vista temporal de las columnas que se pasaran a imputar
    if columnas_a_excluir_final:
        grupo_num = grupo_num.drop(columns=columnas_a_excluir_final) #No toma en
cuenta las exclusiones
        columnas_para_imputar = grupo_num.columns.tolist()
        # Aplicar imputación multivariable solo si hay Na
        if not grupo_num.empty and grupo_num.isnull().any().any():

            try:
                imputer = IterativeImputer( estimator=
ExtraTreesRegressor(n_estimators=10, random_state=0), min_value=0,
random_state=0, tol=1e-4, verbose=2, max_iter=50)
                grupo_imputado = imputer.fit_transform(grupo_num)
                df_imputado_normalizado_inverso = pd.DataFrame(grupo_imputado,
columns=grupo_num.columns, index=grupo_num.index)
                ## imputado = imputer.fit_transform(grupo_num)

                # Se asegura que las columnas correctas se actualicen con los valores
estimados, del "grupo" completo
                grupo[grupo_num.columns] =
df_imputado_normalizado_inverso[grupo_num.columns] #actualiza las columnas
imputadas
                lista_df_imputados.append(grupo) # se añade el grupo a la lista con
los valores imputados y completa, no deja perder los resultados de cada iteracion

```

```

        grupos_imputados += 1 #lleva un registro de id_equipos que fueron
imputados, es un contador.
    except Exception as e:
        grupos_no_imputados += 1 #registra el fallo
        columnas_con_Nan= grupo_num.columns
[grupo_num.isnull().all()].tolist()
        mensaje_error = f"Error al imputar: {str(e)}"
        if columnas_con_Nan:
            mensaje_error += f". Posiblemente sin datos para imputar en: {'',
'.join(columnas_con_Nan)}"

        lista_no_imputados.append({'id_equipo': ideq, 'razon':
mensaje_error})
    else:
        #si no hay valores vacios se agregan aqui
        lista_df_imputados.append(grupo)

# Concatenar todos los DataFrames imputados (y no imputados pero válidos) de la
lista
if lista_df_imputados:
    df_imputado = pd.concat(lista_df_imputados, ignore_index=False) # Dataframe
pero con menos Nan

else:
    df_imputado = pd.DataFrame(columns=df.columns) # Crear un DF vacío si no hay
nada que imputar

# RESULTADOS
# Mostrar lista de id_equipo no imputados
print("Lista de id_equipo NO IMPUTADOS")
if lista_no_imputados:
    for item_error in lista_no_imputados:
        print(f"- {item_error['id_equipo']}: {item_error['razon']}")
else:
    print("Todos los grupos que requerían imputación y eran válidos se imputaron
correctamente.")

# Mostrar resumen
print("RESUMEN FINAL:")
print("Grupos imputados correctamente (mayores de 3 muestras):",
grupos_imputados)
print("Grupos NO imputados:", grupos_no_imputados)

```

```

#print(f"Grupos válidos procesados en total: {len(ids_validos)}") # Añadir conteo
total de grupos válidos

# Mostrar conteo final de faltantes en el DataFrame imputado
faltantes_finales = df_imputado.isnull().sum()
#print("VALORES FALTANTES DESPUÉS DE LA IMPUTACIÓN:")
print(faltantes_finales)

# GRAFICAR SOLO SI HAY NaN en el DataFrame final imputado
if df_imputado.isnull().values.any():
    sns.heatmap(df_imputado.isnull(), cbar=False, cmap="Reds")
    plt.title("Faltantes después de Imputación")
    plt.tight_layout()
    plt.show()
else:
    print("TODOS LOS VALORES FALTANTES FUERON IMPUTADOS O NO APLICABAN.")

# grupos faltantes detalles: IDENTIFICAR id_equipo Y COLUMNA ESPECÍFICA DE NaNs
REMANENTES
print("DETALLE DE VALORES FALTANTES FINALES(EXCLUIDAS-NO EXCLUIDAS)")

# Filtrar solo las filas con nulos en df_imputado
faltantes_en_df_imputado = df_imputado[df_imputado.isnull().any(axis=1)] #busca
las filas que tengan al menos una Nan

if not faltantes_en_df_imputado.empty:
    # Agrupar por id_equipo y luego mostrar las columnas con NaN
    detalle_faltantes = faltantes_en_df_imputado.groupby('id_equipo').apply(
        lambda x: {col: x[col].isnull().sum() for col in x.columns if
x[col].isnull().any()}
    )

    for ideq_err, cols_nan_err in detalle_faltantes.items():
        print(f"\n- {ideq_err}:")
        for col, count in cols_nan_err.items():
            print(f" → {col} ({count} faltantes)")
else:
    print(" No hay valores faltantes en el DataFrame después de la imputación
para los grupos procesados.")

# Guardar resultado final en Excel
df_imputado.to_excel("RESULTADOSIMPUTADOS_TDIFF.xlsx", index=False)
print("Archivo 'RESULTADOS_IMPUTADOS_T/DIFF.xlsx' generado con todos los datos
imputados y no imputados.")

```

## Apéndice G.

### Codificación de alarmas

```

const HOJA_OBJETIVO = "CONSOLIDADO";
const ALERTS_PER_EMAIL_BATCH = 50; // Máximo de alertas por cada correo
electrónico

const UMBRALES_POR_COMPONENTE = {
  // -----
  // REGLAS PARA MOTOR
  // -----
  "MOTOR": {
    "HOLLIN": { tipo: "GTE", valor: 2.9, unidad: " (% / peso)" },
    "HIERRO Fe": { tipo: "GTE", valor: 24, unidad: " (ppm)" },
    "COBRE Cu": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: " (ppm)" },
    "PLOMO Pb": { tipo: "GTE", valor: 2.6, unidad: " (ppm)" },
    "ALUMINIO Al": { tipo: "GTE", valor: 4.24, unidad: " (ppm)" },
    "CROMO Cr": { tipo: "GTE", valor: 1.46, unidad: " (ppm)" },
    "ESTAÑO Sn": { tipo: "GTE", valor: 4.28, unidad: " (ppm)" },
    "SODIO Na": { tipo: "GTE", valor: 11, unidad: " (ppm)" },
    "OXIDACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 17, unidad: " (%)" },
    "% Agua": { tipo: "GTE", valor: 0.057, unidad: " (%)" },
    "DILUCIÓN DE COMBUSTIBLE": { tipo: "GTE", valor: 1.1, unidad: " (%)" },
    "SULFATACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 24.6, unidad: " (%)" },
    "SILICIO Si": { tipo: "GTE", valor: 9.11, unidad: " (ppm)" },
    "NITRACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 9, unidad: " (%)" },

    // Reglas especiales
    "VISCOSIDAD": { tipo: "RANGO_FUERA", min: 11.7, max: 17.21, unidad: "
(cSt)" },
    "TBN": { tipo: "LT", valor: 4.5, unidad: " (mg KOH/g)" }, // TBN MENOR A
4,5
    "GLICOL": { tipo: "GT", valor: 0.0, unidad: " (ppm)" }, // Glicol > 0.0
  },

  // -----
  // REGLAS PARA DIFERENCIAL FRONTAL
  // -----
  "DIFERENCIAL FRONTAL": {
    "HIERRO Fe": { tipo: "GTE", valor: 228, unidad: " (ppm)" },
    "COBRE Cu": { tipo: "GTE", valor: 81, unidad: " (ppm)" },
    "PLOMO Pb": { tipo: "GTE", valor: 1, unidad: " (ppm)" },
  },

```

```
"ALUMINIO Al": { tipo: "GTE", valor: 4, unidad: " (ppm)" },
"CROMO Cr": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: " (ppm)" },
"ESTAÑO Sn": { tipo: "GTE", valor: 3, unidad: " (ppm)" },
"SODIO Na": { tipo: "GTE", valor: 5, unidad: " (ppm)" },
"OXIDACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 5, unidad: " (%)" },
"SILICIO Si": { tipo: "GTE", valor: 27, unidad: " (ppm)" },
"NITRACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 4, unidad: " (%)" },
"ZINC Zn": { tipo: "GTE", valor: 51, unidad: " (ppm)" },

// Reglas especiales
"VISCOSIDAD": { tipo: "RANGO_FUERA", min: 17, max: 28.8, unidad: " (cSt)"
},
"GLICOL": { tipo: "GT", valor: 0.0, unidad: " (ppm)" },
},

// -----
// REGLAS PARA DIFERENCIAL TRASERO
// -----
"DIFERENCIAL TRASERO": {
  "HIERRO Fe": { tipo: "GTE", valor: 296, unidad: " (ppm)" },
  "COBRE Cu": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: " (ppm)" },
  "PLOMO Pb": { tipo: "GTE", valor: 1, unidad: " (ppm)" },
  "ALUMINIO Al": { tipo: "GTE", valor: 8, unidad: " (ppm)" },
  "CROMO Cr": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: " (ppm)" },
  "ESTAÑO Sn": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: " (ppm)" },
  "SODIO Na": { tipo: "GTE", valor: 5, unidad: " (ppm)" },
  "OXIDACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 5, unidad: " (%)" },
  "SILICIO Si": { tipo: "GTE", valor: 52, unidad: " (ppm)" },
  "NITRACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 4, unidad: " (%)" },
  "ZINC Zn": { tipo: "GTE", valor: 48, unidad: " (ppm)" },

  // Reglas especiales
  "VISCOSIDAD": { tipo: "RANGO_FUERA", min: 16, max: 28.9, unidad: " (cSt)"
},
  "GLICOL": { tipo: "GT", valor: 0.0, unidad: " (ppm)" },
},

// -----
// REGLAS PARA TRANSMISION
// -----
"TRANSMISION": {
  "HIERRO Fe": { tipo: "GTE", valor: 271, unidad: " (ppm)" },
  "COBRE Cu": { tipo: "GTE", valor: 56, unidad: " (ppm)" },
  "PLOMO Pb": { tipo: "GTE", valor: 1, unidad: " (ppm)" },
```

```

    "ALUMINIO Al": { tipo: "GTE", valor: 15, unidad: " (ppm)" },
    "CROMO Cr": { tipo: "GTE", valor: 2, unidad: " (ppm)" },
    "ESTAÑO Sn": { tipo: "GTE", valor: 1, unidad: " (ppm)" },
    "SODIO Na": { tipo: "GTE", valor: 40, unidad: " (ppm)" },
    "OXIDACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 40, unidad: " (%)" },
    "SILICIO Si": { tipo: "GTE", valor: 86, unidad: " (ppm)" },
    "NITRACIÓN": { tipo: "GTE", valor: 5, unidad: " (%)" },
    "ZINC Zn": { tipo: "GTE", valor: 985, unidad: " (ppm)" },

    // Reglas especiales
    "VISCOSIDAD": { tipo: "RANGO_FUERA", min: 13.1, max: 19.7, unidad: "
(cSt)" },
    "GLICOL": { tipo: "GT", valor: 0.0, unidad: " (ppm)" },
  }
};

/**
 * Función principal que verifica los nuevos datos en la hoja de cálculo
 * y envía un correo electrónico si se detectan alertas.
 * * 🚨 IMPORTANTE: Este script revisa TODAS las filas que se han agregado
 * desde la última ejecución del trigger.
 */
function verificarNuevosDatos() {
  const libro = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet();
  const hoja = libro.getSheetByName(HOJA_OBJETIVO);

  if (!hoja) {
    Logger.log(`Error: No se encontró la hoja con el nombre
"${HOJA_OBJETIVO}"`);
    return;
  }

  const datos = hoja.getDataRange().getValues();
  // Limpia y asegura que los encabezados sean strings para la comparación
  exacta.
  const encabezados = datos[0].map(h => String(h).trim());
  const filas = datos.slice(1); // Datos de la fila 2 en adelante

  const properties = PropertiesService.getScriptProperties();
  // Obtiene el número de filas de datos (sin encabezado) procesadas
  anteriormente
  const ultimaFilaLeida = Number(properties.getProperty("ultima_fila_leida") ||
0);

```

```
const filasTotales = filas.length;

// Manejo de reinicio si la hoja es vaciada
if (filasTotales < ultimaFilaLeida) {
  properties.setProperty("ultima_fila_leida", 0);
  Logger.log("La hoja fue truncada. Reiniciando contador de filas
leídas.");
  return;
}

// --- LÓGICA CLAVE: Seleccionar TODAS las nuevas filas ---
const filasAProcesar = filas.slice(ultimaFilaLeida);

if (filasAProcesar.length === 0) {
  Logger.log("No hay nuevas filas para procesar.");
  return;
}
// --- Fin de Lógica Clave ---

// --- Búsqueda de índices de columnas clave ---
const indiceComponente = encabezados.indexOf("COMPONENTE");
const indicePlaca = encabezados.indexOf("PLACA");

if (indiceComponente === -1) {
  Logger.log("Error: No se encontró la columna 'COMPONENTE'. No se pueden
aplicar límites condicionales.");
  return;
}
// --- Fin Búsqueda de índices ---

let alertas = [];

// Iteramos sobre TODAS las filas agregadas en este lote
filasAProcesar.forEach((fila, i) => {
  // Calcular el número de fila real en la hoja (para referenciar el dato)
  const numFilaReal = ultimaFilaLeida + i + 2;

  const componente = String(fila[indiceComponente]).trim().toUpperCase();
  const placa = indicePlaca !== -1 ? String(fila[indicePlaca]).trim() :
"N/D"; // El valor de PLACA

  const umbrales = UMBRALES_POR_COMPONENTE[componente];
```

```

    let mensajeFila = ` 🚨 ALERTA: Fila ${numFilaReal}, PLACA: ${placa},
COMPONENTE: ${componente}\n`;
    let detallesAlerta = "";
    let hayAlertaEnFila = false;

    if (!umbrales) {
        Logger.log(`Fila ${numFilaReal}: Componente "${componente}" no tiene
límites definidos. Saltando.`);
        return;
    }

    // Itera sobre las columnas de la fila actual para aplicar límites
    encabezados.forEach((col, j) => {
        const umbral = umbrales[col];
        // Aseguramos que solo se evalúen celdas que contienen números
válidos
        const valorCelda = Number(fila[j]);

        if (umbral && fila[j] !== "" && !isNaN(valorCelda)) {
            let alertaActivada = false;
            let descripcionUmbral = "";

            // --- LÓGICA DE VERIFICACIÓN DE UMBRALES ---

            switch (umbral.tipo) {
                case "GTE": // Mayor o Igual (>=)
                    alertaActivada = valorCelda >= umbral.valor;
                    descripcionUmbral = `Límite: >=
${umbral.valor}${umbral.unidad}`;
                    break;
                case "GT": // Mayor que (>)
                    alertaActivada = valorCelda > umbral.valor;
                    descripcionUmbral = `Límite: >
${umbral.valor}${umbral.unidad}`;
                    break;
                case "LT": // Menor que (<)
                    alertaActivada = valorCelda < umbral.valor;
                    descripcionUmbral = `Límite: <
${umbral.valor}${umbral.unidad}`;
                    break;
                case "RANGO_FUERA": // Fuera de rango (Viscosidad)
                    // Alerta si es mayor al MAX o menor al MIN
                    alertaActivada = (valorCelda > umbral.max || valorCelda <
umbral.min);

```

```

        descripcionUmbral = `Límite: Fuera del rango
[${umbral.min} - ${umbral.max}]${umbral.unidad}`;
        break;
        default:
            return;
    }

    if (alertaActivada) {
        // Aquí se inserta la unidad (texto) SOLO en el mensaje de
alerta.
        detallesAlerta += `- ${col}: Valor actual
${valorCelda}${umbral.unidad}. ${descripcionUmbral}\n`;
        hayAlertaEnFila = true;
    }
}
});

if (hayAlertaEnFila) {
    // Se agrega el mensaje completo (encabezado + detalles) por cada
fila con alerta
    alertas.push(mensajeFila + detallesAlerta);
}
});

// Actualiza el contador para indicar que todas las filas (filasTotales) han
sido procesadas.
properties.setProperty("ultima_fila_leida", filasTotales);
Logger.log(`Se ha actualizado ultima_fila_leida a: ${filasTotales}.`);

// --- Envío de Correo (MODIFICADO para envío por lotes) ---
if (alertas.length > 0) {
    const totalAlerts = alertas.length;
    const batchSize = ALERTS_PER_EMAIL_BATCH;
    const totalBatches = Math.ceil(totalAlerts / batchSize);

    Logger.log(`Total de alertas detectadas: ${totalAlerts}. Iniciando envío
en ${totalBatches} lotes de ${batchSize} alertas.`);

    for (let i = 0; i < totalBatches; i++) {
        const start = i * batchSize;
        const end = start + batchSize;
        const batch = alertas.slice(start, end);

        const loteNum = i + 1;

```

```
    const currentBatchAlertCount = batch.length;

    // Construir el cuerpo del correo para el lote actual
    const cuerpoCorreo = `Se detectaron ${currentBatchAlertCount} valores
fuera de rango. Este es el Lote ${loteNum} de ${totalBatches}: \n\n` +
        batch.join("\n") +
        "\n\nVerifique la hoja: " + libro.getUrl();

    // Enviar el correo
    MailApp.sendEmail({
        to: "jocarolina1527@hotmail.com",
        subject: `🚨 ALERTA LÍMITES CONDENATORIOS (Lote ${loteNum} de
${totalBatches} - ${currentBatchAlertCount} filas)`,
        body: cuerpoCorreo
    });

    Logger.log(`Lote ${loteNum} de ${totalBatches} enviado con
${currentBatchAlertCount} alertas.`);
}
} else {
    Logger.log("No se detectaron alertas para enviar correo.");
}
}
```