



Pontificia Universidad Católica Argentina
Facultad de Humanidades y Ciencias Económicas

TRABAJO FINAL:
***CONTROL DE LA GENERACIÓN REAL DE ACEITES USADOS EN
EMPRESAS VIALES***

Autor: MENDEZ, Cristian Damián

Profesores: Lic. Jorge Vera
Prof. Casado Débora

Mendoza, junio 2026

DECLARACIÓN JURADA

"Los conceptos y opiniones vertidos en el texto publicado y del uso que otros puedan hacer de ellos son de exclusiva responsabilidad del autor. Dicha responsabilidad se asume con la sola impresión y presentación del trabajo de tesina ante el tribunal por el autor."

Declaración jurada: "Por la presente declaro que esta propuesta es mi propio trabajo y hasta donde yo sé y creo, no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona, ni material que de manera substancial haya sido aceptado para el otorgamiento de premios de cualquier otro grado o diploma de la universidad u otro instituto de enseñanza superior, excepto donde se ha hecho reconocimiento debido en el texto".

"Nota del Autor: Las fotografías con derecho de autor han sido incluidas en este trabajo de investigación respondiendo únicamente a un interés académico, sin un fin de lucro".



.....
Mendez Cristian

Índice

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN AL ALU COMO RESIDUO	9
<i>A. Caracterización del ALU</i>	<i>9</i>
<i>B. Delimitación del problema</i>	<i>12</i>
<i>C. Síntesis y posicionamiento</i>	<i>14</i>
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO	15
<i>A. Marco Legal y Normativo</i>	<i>15</i>
<i>B. Normativa Internacional.....</i>	<i>19</i>
CAPÍTULO III: MAQUINARIA VIAL Y OBRADOR	21
<i>A. Clasificación de la maquinaria vial.....</i>	<i>21</i>
<i>B. Sistemas de lubricación en la maquinaria vial y su relación con la generación de ALU</i>	<i>22</i>
<i>C. Caracterización técnica de la maquinaria vial esencial</i>	<i>29</i>
<i>D. Obrador vial</i>	<i>40</i>
<i>E. Proceso de generación de ALU en el Obrador</i>	<i>42</i>
<i>F. Requisitos normativos del RDT</i>	<i>44</i>
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y FORMULACIÓN	50
<i>A. Objetivo General.....</i>	<i>51</i>
<i>B. Tipo, diseño y alcance</i>	<i>51</i>
<i>C. Unidad de análisis</i>	<i>52</i>
<i>D. Fuente de datos</i>	<i>53</i>
<i>E. Procedimiento de extracción de parámetros técnicos</i>	<i>55</i>
<i>F. Matriz de control</i>	<i>56</i>
<i>G. Formulación del Modelo de Estimación</i>	<i>58</i>
<i>H. Procedimiento de verificación cruzada</i>	<i>63</i>

<i>I. Escenarios de simulación</i>	64
<i>J. Métodos de análisis</i>	64
<i>K. Limitaciones del modelo</i>	65
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y CONCLUSIONES	67
<i>A. Verificación de Hipótesis</i>	71
<i>B. Análisis de sensibilidad del modelo</i>	72
<i>C. Propuesta de mejora</i>	73
<i>D. Análisis de los resultados obtenidos</i>	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXO I	79
ANEXO II	80

RESUMEN

El presente trabajo aborda la problemática de la subdeclaración de aceites lubricantes usados (ALU) como residuos peligrosos de categoría Y8 por parte de empresas del sector vial de la provincia de Mendoza, Argentina. El propósito central es el diseño y validación de un modelo técnico de control basado en el principio de balance de masas, que permita a la Dirección de Gestión y Fiscalización Ambiental (DGFA) estimar de manera independiente la generación real esperada de ALU en función de parámetros objetivos del parque de maquinaria de cada empresa, y contrastar esa estimación con los volúmenes informados en las declaraciones juradas anuales.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo combina una componente documental (basada en el relevamiento sistemático de manuales técnicos originales de fabricantes de maquinaria pesada, de los cuales se extrajeron la capacidad nominal del cárter de motor (C) y el intervalo de cambio de aceite recomendado (I) para diez equipos representativos del sector) con una componente de simulación técnica controlada, en la que la variable operativa de horas de trabajo (H) se construyó a partir de tres escenarios de intensidad de uso: intensivo (1.750 horas anuales por equipo), moderado (1.000 horas) y mínimo (400 horas). El modelo incorpora un Factor de Recuperación Operativa ($Fp = 0,90$) y un Factor de Condición Operativa ($Fco = 0,5$ para condiciones de uso severo, valor por defecto para el sector vial mendocino), aplicados mediante la fórmula $GRE = [H / (I \cdot Fco)] \cdot C \cdot Fp$, donde la función piso garantiza que solo se contabilizan los cambios de aceite efectivamente completados durante el período analizado.

Los resultados de la aplicación del modelo al parque simulado arrojaron una Generación Real Esperada total de 984,3 litros anuales para el escenario de uso intensivo, de 562,3 litros para uso moderado y de 148,1 litros para uso mínimo, considerando exclusivamente el aceite de motor como estimación de piso mínimo. El análisis de escenarios de subdeclaración hipotética demostró que el modelo detecta consistentemente omisiones del 30% y del 50% de la GRE en los tres escenarios sin generar alertas falsas sobre declaraciones íntegras o con variaciones dentro del margen de error técnico acumulado del modelo, estimado en 10 a 15%.

Se concluye que la hipótesis de trabajo queda verificada: un modelo de balance de masas basado en parámetros de manuales de fabricantes permite detectar subdeclaraciones de ALU de magnitud relevante en empresas viales de manera técnicamente sólida, jurídicamente sostenible y operativamente simple. El protocolo propuesto (compuesto por la fórmula de estimación y la Matriz de Control de ocho columnas) constituye una herramienta de gestión ambiental provincial que transforma el sistema de control pasivo vigente en un sistema de control activo, sin requerir modificaciones normativas ni infraestructura tecnológica adicional.

Palabras clave: residuos peligrosos; aceites lubricantes usados; subdeclaración; balance de masas; control ambiental; maquinaria vial; trazabilidad; generación esperada; Mendoza.

ABSTRACT

This study addresses the underreporting of used lubricating oils (ULO) as hazardous waste (category Y8) by road construction companies in the province of Mendoza, Argentina. The main purpose is the design and validation of a technical control model based on the mass balance principle, enabling the provincial environmental regulatory authority (DGFA) to independently estimate the expected real generation of ULO from objective parameters of each company's machinery fleet, and to compare that estimate against the volumes declared in annual sworn statements.

The methodology combines a documentary component (based on the systematic review of original technical manuals from heavy machinery manufacturers, from which the nominal engine oil sump capacity (C) and the manufacturer-recommended oil change interval (I) were extracted for ten representative pieces of equipment) with a controlled technical simulation component, in which the operational variable of working hours (H) was constructed from three usage intensity scenarios: intensive (1,750 annual hours per unit), moderate (1,000 hours), and minimum (400 hours). The model incorporates an Operational Recovery Factor ($Fp = 0.90$) and an Operational Condition Factor ($Fco = 0.5$ for severe use conditions, the default value for the Mendoza road sector), applied through the formula $GRE = [H / (I \cdot Fco)] \cdot C \cdot Fp$, where the floor function ensures that only fully completed oil changes within the analyzed period are counted.

The results of applying the model to the simulated fleet yielded a total Expected Real Generation of 984.3 liters per year under the intensive use scenario, 562.3 liters under moderate use, and 148.1 liters under minimum use, considering only engine oil as a minimum floor estimate. The hypothetical underreporting scenario analysis demonstrated that the model consistently detects omissions of 30% and 50% of the GRE across all three scenarios without generating false alerts for complete declarations or for variations within the model's accumulated technical error margin, estimated at 10 to 15%.

It is concluded that the working hypothesis is verified: a mass balance model based on manufacturer manual parameters can detect significant ULO underreporting in road construction companies in a technically sound, legally sustainable, and operationally simple manner. The proposed protocol (comprising the estimation formula and the eight-column Control Matrix) constitutes a provincial environmental management tool that transforms the current passive control system into an active control system, without requiring regulatory amendments or additional technological infrastructure.

Keywords: hazardous waste; used lubricating oil; underreporting; mass balance; environmental control; road machinery; traceability; expected generation; Mendoza.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los residuos peligrosos generados por el sector productivo constituye uno de los desafíos centrales de la política ambiental en Argentina y, en particular, en la provincia de Mendoza. Entre los residuos de mayor volumen generado por la industria de la construcción vial se encuentran los aceites lubricantes usados (ALU), clasificados bajo la categoría Y8 de la Ley Nacional N°24.051 como aceites minerales usados no aptos para el uso al que estaban destinados. Su composición (metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos clorados y aditivos degradados) les confiere propiedades de toxicidad, inflamabilidad y alta capacidad contaminante del suelo y el agua que justifican su tratamiento como residuo peligroso y la obligación normativa de su correcta declaración y disposición final (ATSDR, 1997; Vázquez-Duhalt, 1989).

El marco legal vigente en Mendoza (articulado sobre la Ley Provincial N°5.917/92, el Decreto N°2.625/99 y las resoluciones complementarias de la Dirección de Gestión y Fiscalización Ambiental) establece la obligación de los generadores de inscribirse en el Registro Provincial de Generadores de Residuos Peligrosos y de presentar una declaración jurada anual informando los volúmenes de cada tipo de residuo generado. Sin embargo, ese sistema presenta una brecha estructural: la declaración es el único mecanismo de información disponible y no existe ningún procedimiento técnico estandarizado que permita verificar de manera independiente si los volúmenes informados son coherentes con la actividad real de la empresa. El sistema depende, en última instancia, de la buena fe del generador.

Esta situación crea las condiciones para que la subdeclaración de ALU sea una práctica extendida y difícilmente detectable. Las empresas viales que operan con flotas propias de maquinaria pesada pueden reducir sus costos de disposición final (a cargo de operadores habilitados) informando volúmenes inferiores a los realmente generados, sin que el ente regulador cuente con herramientas para identificar la irregularidad. El residuo subdeclarado queda fuera de la cadena formal de trazabilidad, con los riesgos ambientales y sanitarios que ello implica. A nivel internacional, los modelos de balance de materiales han sido ampliamente utilizados para abordar este tipo de problemas, permitiendo estimar la generación esperada de residuos a partir de datos de proceso y compararla con lo efectivamente declarado (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994). En Argentina, sin embargo, su aplicación sistemática al sector vial y a los aceites lubricantes usados no ha sido documentada.

El presente trabajo tiene como propósito central el diseño y validación de un modelo técnico de control basado en el principio de balance de masas, que permita a la DGFA estimar de manera independiente la generación real esperada de ALU en función de parámetros objetivos del parque de maquinaria de cada empresa (extraídos de los manuales técnicos de los fabricantes, que son de dominio público) y contrastar esa estimación con los volúmenes declarados, activando un protocolo de inspección cuando la discrepancia supere el umbral técnicamente justificado. El modelo opera exclusivamente con datos verificables: la capacidad nominal del cárter de motor, el intervalo de cambio recomendado por el fabricante y las horas de operación registradas en los controles horométricos del equipo.

La importancia de esta investigación se sostiene en tres dimensiones convergentes. Desde el punto de vista ambiental, un litro de aceite usado tiene capacidad de contaminar hasta un millón de litros de agua (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019), lo que hace de la trazabilidad completa del ALU una prioridad para una provincia como Mendoza, donde el agua es un recurso escaso y

estratégico. Desde el punto de vista normativo, el trabajo no propone modificar el marco legal vigente sino dotarlo de la herramienta técnica que le falta: el estándar de referencia que convierte al inspector en un auditor activo. Desde el punto de vista operativo, el protocolo está diseñado para ser aplicado en campo con una calculadora de mano o una hoja de cálculo básica, sin infraestructura tecnológica adicional, lo que garantiza su viabilidad de implementación inmediata.

El trabajo se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo I presenta la conceptualización del aceite lubricante usado como residuo peligroso: su origen, tipos presentes en la maquinaria vial, composición, propiedades de peligrosidad y delimitación del problema de investigación, junto con el estado del conocimiento en los planos internacional y nacional. El Capítulo II desarrolla el Marco Teórico, abordando el sistema normativo nacional y provincial aplicable a la gestión de ALU en el sector vial mendocino y la articulación del modelo propuesto con los requisitos de la norma ISO 14001:2015. El Capítulo III presenta la tipología de maquinaria vial relevante para el modelo, describiendo las características técnicas de los equipos que componen el parque simulado y sus parámetros de lubricación. El Capítulo IV desarrolla la Metodología: el planteamiento del problema, la hipótesis y objetivos, el tipo y diseño de la investigación, las fuentes de datos, la formulación matemática del modelo y el protocolo operativo de aplicación. El Capítulo V presenta los Resultados, la Propuesta institucional y las Conclusiones del trabajo, incluyendo la aplicación numérica del modelo al parque simulado bajo tres escenarios de intensidad operativa y la verificación de la hipótesis.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN AL ALU COMO RESIDUO

El presente trabajo aborda la problemática de la subdeclaración de aceites lubricantes usados (ALU) como residuos peligrosos por parte de empresas del sector vial de la provincia de Mendoza. Específicamente, se propone el diseño de un modelo técnico de control (basado en principios de balance de masas) que permita a la DGFA estimar de manera independiente la generación esperada de ALU en función de parámetros objetivos del parque de maquinaria de cada empresa, y contrastar esa estimación con los volúmenes informados en las declaraciones juradas anuales.

A. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE USADO (ALU)

Para diseñar un modelo de control que permita estimar la generación real de aceites usados, es necesario entender primero qué es ese residuo desde el punto de vista técnico: cómo se forma, qué contiene, por qué es peligroso y de qué manera se diferencia según el tipo de maquinaria que lo genera. Ese conocimiento técnico es el que justifica el tratamiento que la normativa le da al ALU y, al mismo tiempo, el que permite construir los indicadores de generación esperada que se desarrollan en el capítulo metodológico.

1. Definición y origen del aceite lubricante usado

El aceite lubricante es un fluido de origen mineral, sintético o semisintético cuya función principal dentro de un motor o sistema mecánico es reducir la fricción entre superficies en movimiento, disipar el calor generado por esa fricción, proteger los componentes metálicos contra la corrosión y mantener el sistema limpio mediante la suspensión de partículas contaminantes. Para cumplir esas funciones, el aceite base se formula con un paquete de aditivos que incluye detergentes, dispersantes, antidesgaste, antioxidantes y mejoradores de viscosidad, entre otros (Vázquez-Duhalt, 1989).

Durante su uso, ese aceite se somete a condiciones extremas de temperatura, presión y contaminación que lo degradan progresivamente. Las cadenas hidrocarbonadas de la base se oxidan y se rompen, los aditivos se consumen o se descomponen, y el fluido incorpora una carga creciente de contaminantes externos: partículas metálicas provenientes del desgaste de las piezas del motor, hollín y productos de la combustión incompleta del combustible, agua proveniente de la condensación o de pequeñas fugas del sistema de enfriamiento, y tierra o polvo que ingresa a través del sistema de filtración (Vázquez-Duhalt, 1989). Cuando esa acumulación de contaminantes supera el umbral a partir del cual el aceite ya no puede cumplir sus funciones, debe ser reemplazado. El fluido resultante de ese reemplazo es el aceite lubricante usado, o ALU.

Si bien autores como Vázquez-Duhalt (1989) sostienen que la estimación debe considerar todas las fuentes de generación de manera simultánea, el presente trabajo adopta un criterio de estimación mínima centrado en el sistema de lubricación del motor para garantizar un modelo de control operativo y factible en el ámbito de Higiene, Seguridad, Calidad y Medio Ambiente.

2. Tipos de aceites presentes en la maquinaria vial

La maquinaria vial analizada en este trabajo (topadoras, motoniveladoras, cargadoras frontales, retroexcavadoras, mini palas retro, camiones volcadores, camiones cisterna, camiones batea, terminadoras asfálticas, compactadores neumáticos y compactadores de rodillo) opera con distintos tipos de aceites según el sistema al que pertenecen: aceite de motor, aceite hidráulico, aceite de transmisión y aceite de mandos finales, entre los principales. Cada uno de esos sistemas tiene su propia capacidad, su propia frecuencia de cambio y, por lo tanto, su propia contribución al volumen total de ALU generado por equipo.

El aceite hidráulico constituye una fuente secundaria de ALU. Es el fluido que transmite potencia en los sistemas de brazos, baldes, cilindros y articulaciones de los equipos. Se utilizan mayormente aceites de base mineral con clasificación ISO VG 46 o ISO VG 68. Los depósitos hidráulicos en maquinaria pesada pueden tener capacidades significativas: una retroexcavadora mediana puede contener entre 60 y 120 litros, mientras que una topadora o cargadora de gran porte puede superar los 200 litros. Los intervalos de cambio se ubican generalmente entre 1.000 y 2.000 horas. Este sistema puede incorporarse al modelo como variable secundaria en aquellos casos en que los manuales técnicos de los equipos relevados especifiquen la capacidad del depósito y el intervalo de cambio recomendado.

El aceite de transmisión y mandos finales lubrica la caja de velocidades, los diferenciales y los mandos finales. Se utilizan aceites con clasificación API GL-4 o GL-5 en grados SAE 80W-90 o 85W-140, aunque algunos fabricantes especifican fluidos propietarios. En equipos con mandos finales independientes, cada cárter puede contener varios litros adicionales que deben reemplazarse de manera separada. Los intervalos de cambio suelen ubicarse entre 500 y 1.000 horas. Al igual que el aceite hidráulico, este sistema figura en la mayoría de los manuales técnicos, aunque a veces aparece desagregado por subsistema (caja, diferencial y mandos), lo que puede requerir una sumatoria para obtener el volumen total por equipo.

Sin embargo, a los fines del modelo de control propuesto en este trabajo, el análisis se enfoca exclusivamente en el aceite de motor como variable de estimación. Esta decisión no es arbitraria sino que responde a razones técnicas concretas que surgieron del propio relevamiento de manuales realizado durante el desarrollo del trabajo. El primer relevamiento efectuado (correspondiente al compactador de rodillo HAMM HD+ 120 y HD+ 140) confirmó que los sistemas complementarios no responden a una lógica estandarizable entre distintos tipos de equipos: mientras algunos tienen transmisión mecánica convencional con cárter y diferencial, otros utilizan sistemas hidrostáticos que resuelven la tracción de manera completamente diferente, sin los componentes que un modelo de transmisión estándar asumiría. Intentar incorporar esos sistemas en un modelo universal introduciría variables que no pueden ser verificadas de manera uniforme en una inspección de campo, lo que reduciría la utilidad práctica del protocolo de control.

El aceite de motor, en cambio, reúne cuatro condiciones que lo convierten en el indicador más robusto y confiable para los fines de este trabajo. Es el sistema presente en todos los equipos del parque sin excepción. Es el que se cambia con mayor frecuencia, lo que lo convierte en la fuente de mayor volumen acumulado de ALU a lo largo del tiempo. Es el mejor documentado en los manuales técnicos

de los fabricantes, que especifican siempre la capacidad del cárter en litros y el intervalo de cambio en horas. Y es el registro que las empresas tienen mayor probabilidad de llevar de manera sistemática, lo que facilita tanto el relevamiento como la contrastación con los volúmenes declarados ante el ente regulador. En motores diésel de maquinaria pesada, la viscosidad típica es 15W-40 en formulaciones minerales o 10W-40 en semisintéticos y sintéticos. Los intervalos de cambio estándar oscilan entre 250 y 500 horas de trabajo, pudiendo extenderse hasta 1.000 horas con aceites sintéticos en condiciones de operación favorables.

En este marco, el aceite de motor funciona como indicador testigo de la generación total de ALU de la empresa: si el volumen declarado no cubre siquiera lo que el modelo estima para el aceite de motor solo, la subdeclaración es evidente sin necesidad de sumar los sistemas complementarios. Esa lógica de estimación mínima es la que le otorga al modelo su solidez operativa y su utilidad práctica para el ente regulador.

3. Composición y características de peligrosidad del ALU

El aceite lubricante nuevo es un producto relativamente estable y de baja toxicidad aguda. Sin embargo, después de su uso adquiere una composición completamente diferente que lo convierte en uno de los residuos peligrosos más relevantes del sector industrial y vial (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 1997).

Desde el punto de vista físico-químico, el ALU es un líquido viscoso de color pardo oscuro a negro, con olor característico a combustible quemado. Su composición incluye los hidrocarburos del aceite base degradados, los restos de los aditivos originales descompuestos y una carga de contaminantes incorporados durante el uso. Entre los más significativos se encuentran los metales pesados, particularmente plomo, zinc, calcio, bario, magnesio, hierro, aluminio y cromo (Vázquez-Duhalt, 1989). El zinc y el bario son subproductos de la descomposición de los aditivos antidesgaste y detergentes del aceite original. El cromo, el hierro y el aluminio provienen del desgaste mecánico de las partes internas del motor.

Además de los metales, el ALU contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), compuestos de alto peso molecular formados por la degradación térmica del aceite base durante la operación (Vázquez-Duhalt, 1989). Varios de estos compuestos están clasificados como cancerígenos probables o confirmados para los seres humanos (ATSDR, 1997), lo que les otorga relevancia directa desde la perspectiva de la higiene y seguridad ocupacional. El personal de mantenimiento que manipula ALU sin la protección adecuada está expuesto a irritaciones dérmicas, problemas respiratorios por inhalación de vapores y riesgo de absorción cutánea de metales pesados y HAPs con potencial carcinogénico (ATSDR, 1997).

Otra familia de contaminantes de preocupación son los policlorobifenilos (PCBs), que pueden aparecer en aceites usados de sistemas más antiguos, y los compuestos clorados en general, que generan emisiones altamente tóxicas cuando el aceite es quemado a bajas temperaturas. También se detectan en el ALU azufre en diversas formas, fósforo proveniente de los aditivos antidesgaste del tipo ZDDP, y agua en proporciones variables según el estado del sistema de enfriamiento del equipo.

Esta combinación de características le otorga al ALU tres propiedades de peligrosidad reconocidas por la Ley N°24.051 y su Decreto Reglamentario N°831/93: toxicidad, inflamabilidad y alta capacidad contaminante del suelo y el agua. En relación con esta última, el ALU forma películas superficiales sobre los cuerpos de agua que bloquean el intercambio de oxígeno e impiden el paso de la luz, con efectos letales para la biota acuática (ATSDR, 1997). Los hidrocarburos que alcanzan el suelo se adhieren a las partículas del terreno y no son biodegradables en el corto plazo, destruyendo la estructura del suelo y afectando su fertilidad de manera persistente (Vázquez-Duhalt, 1989). Estas propiedades son las que justifican la inclusión del ALU en la categoría Y8 del Anexo I de la Ley N°24.051, que refiere específicamente a aceites minerales usados no aptos para el uso al que estaban destinados, y la obligación normativa de su correcta declaración y disposición final (Argentina, 1992).

Desde el punto de vista de la salud ocupacional, el personal de mantenimiento de maquinaria que manipula ALU sin la protección adecuada está expuesto a irritaciones dérmicas, problemas respiratorios por inhalación de vapores, y riesgo de absorción cutánea de metales pesados y HAPs con potencial carcinogénico. Esta dimensión de la gestión del ALU es especialmente relevante en el marco de la Licenciatura en Higiene y Seguridad, Calidad y Medio Ambiente ya que refuerza la necesidad de contar con procedimientos formales y controlados para su manejo, más allá de la obligación ambiental de declararlo correctamente.

B. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El trabajo se circunscribe a empresas privadas del sector vial activas en la provincia de Mendoza (con especial referencia a la zona de influencia del Departamento de San Rafael) que ejecutan obras de construcción, mantenimiento o servicios viales con flota propia de maquinaria pesada y que tienen obligación de inscripción en el Registro Provincial de Generadores de Residuos Peligrosos dependiente de la DGFA. El modelo propuesto es, no obstante, generalizable a cualquier jurisdicción provincial que cuente con un sistema de declaración de residuos peligrosos análogo.

El problema se aborda bajo una lógica de estados de actividad, permitiendo que el modelo propuesto evalúe la consistencia de las declaraciones juradas de ALU en función del uso real y técnico del parque de maquinaria. Al desvincular el control de un período cronológico específico, la investigación garantiza que la metodología de estimación sea una herramienta de aplicación continua y permanente, capaz de capturar la variabilidad de los ciclos de generación tanto en etapas de retracción como de máxima expansión de la actividad vial.

El objeto de estudio se delimita a los aceites lubricantes usados generados por el sistema de lubricación del motor de cada equipo del parque de maquinaria vial. Esta elección responde a que el aceite de motor es el fluido que se cambia con mayor frecuencia, el mejor documentado en los manuales técnicos de los fabricantes y el que representa la mayor fracción del volumen acumulado de ALU generado por un obrador vial. Los sistemas hidráulicos, de transmisión y mandos finales, si bien también generan ALU, quedan fuera del alcance del modelo propuesto; su incorporación queda planteada como línea de trabajo futuro. Esta restricción es deliberada y fortalece el carácter conservador del modelo: la GRE

calculada representa un piso mínimo por debajo del cual la declaración de una empresa no puede ubicarse sin generar una inconsistencia técnica evidente.

La relevancia de este trabajo se sustenta en tres dimensiones convergentes: ambiental, normativa y operativa.

1. Estado actual del conocimiento en el plano internacional

La problemática de la subdeclaración de residuos peligrosos y los mecanismos para su detección han sido abordados en la literatura internacional desde distintas disciplinas. El enfoque más consolidado es el de los modelos de balance de materiales (material flow analysis, MFA), que aplican el principio de conservación de la materia para estimar la generación esperada de residuos a partir de datos de proceso y compararla con lo efectivamente declarado o gestionado.

Tchobanoglous, Theisen y Vigil (1994), en su obra de referencia sobre gestión integral de residuos sólidos, desarrollan los fundamentos del balance de masas como herramienta de cuantificación de flujos de residuos, estableciendo la metodología básica que este trabajo adapta al contexto específico de los aceites lubricantes usados en maquinaria pesada. La aplicación del balance de masas a la estimación de generación de residuos peligrosos en procesos industriales ha sido documentada en diversas jurisdicciones de la Unión Europea, donde agencias como la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) utilizan estos modelos para validar los datos reportados por los Estados miembros en el marco del Reglamento Europeo de Estadísticas de Residuos.

En lo que respecta específicamente a los aceites lubricantes usados, la literatura científica destaca su relevancia como residuo peligroso de elevada generación y alta capacidad contaminante. Vázquez-Duhalt (1989) y la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 1997) han documentado en detalle la composición del ALU y sus efectos sobre la salud humana y los ecosistemas, constituyendo las referencias técnicas de base para la caracterización del residuo. En el ámbito de la gestión, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) ha desarrollado guías de estimación de generación de aceites usados basadas en factores de consumo por tipo de motor y frecuencia de cambio, que son conceptualmente afines al modelo propuesto en este trabajo.

Desde la perspectiva de los sistemas de gestión ambiental, la Norma ISO 14001:2015 establece requisitos de identificación y cuantificación de aspectos ambientales significativos (cláusula 6.1.2) y de seguimiento y medición del desempeño ambiental (cláusula 9.1) que son directamente aplicables a la gestión del ALU en empresas viales. La articulación entre el modelo técnico propuesto y los requisitos de la norma ISO constituye uno de los aportes diferenciadores de este trabajo respecto de los antecedentes identificados.

2. Estado actual del conocimiento en el plano nacional y provincial

En el contexto argentino, la gestión de residuos peligrosos está regulada desde 1992 por la LeyN°24.051 y su Decreto Reglamentario N°831/93, que establecen el marco para la clasificación, declaración, transporte y disposición final de este tipo de residuos. Sin embargo, la literatura académica sobre mecanismos de control técnico de la veracidad de las declaraciones de generadores es notoriamente escasa.

Esa ausencia de parámetros técnicos de referencia que permitan a los organismos de control evaluar la coherencia de las declaraciones recibidas constituye el punto de partida del presente trabajo.

A nivel internacional, los modelos de balance de materiales han sido ampliamente utilizados para abordar este tipo de problemas (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994). En Argentina, experiencias de análisis de flujo de materiales han sido aplicadas en contextos industriales regionales (incluyendo Mendoza) para estimar flujos de residuos entre procesos productivos (Benito y Arena, 2022), aunque su aplicación sistemática al sector vial y a los aceites lubricantes usados no ha sido documentada.

En el ámbito provincial, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Mendoza (actualmente integrada al Ministerio de Energía y Ambiente) publicó en 2019 una guía de gestión de residuos peligrosos dirigida a generadores inscritos en el Registro Provincial. Si bien esa guía no incorpora herramientas de estimación de generación esperada, establece el marco procedimental sobre el que opera el sistema de control que este trabajo busca fortalecer.

No se han identificado en la literatura disponible trabajos específicos sobre la cuantificación de la generación de ALU en empresas viales de Mendoza ni sobre el diseño de protocolos de control técnico aplicables por inspectores de la DGFA. Esa ausencia representa el nicho de contribución original que justifica la realización de la presente investigación.

C. SÍNTESIS Y POSICIONAMIENTO DEL PRESENTE TRABAJO

Del balance bibliográfico realizado pueden extraerse tres conclusiones que fundamentan el aporte original de esta investigación. En primer lugar, la metodología del balance de masas está consolidada en la literatura internacional como herramienta de estimación de generación de residuos, pero su aplicación sistemática al sector vial argentino y a los aceites lubricantes usados en particular no ha sido documentada. En segundo lugar, la problemática de la subdeclaración de residuos peligrosos en Argentina ha sido identificada como un problema estructural del sistema de control, pero las propuestas de solución existentes son de carácter normativo o procedimental, sin incorporar modelos técnicos de estimación. En tercer lugar, la articulación entre el modelo de balance de masas, el marco normativo provincial específico de Mendoza y los requisitos de la ISO 14001:2015 no ha sido abordada en ninguno de los antecedentes relevados.

El presente trabajo se posiciona en la intersección de esas tres brechas: propone un modelo técnico concreto, validado sobre parámetros reales de maquinaria vial, diseñado específicamente para el marco normativo provincial mendocino y articulado con los estándares internacionales de gestión ambiental. Su aporte central es la traducción de un principio metodológico establecido (el balance de masas) en un protocolo operativo directamente utilizable por el ente regulador provincial, sin necesidad de infraestructura tecnológica adicional ni de acceso a información confidencial de las empresas fiscalizadas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

El presente capítulo desarrolla los fundamentos conceptuales, normativos y técnicos sobre los que se apoya el modelo de control propuesto en este trabajo. Su organización responde a una lógica progresiva: primero se analiza el marco legal y normativo que regula la gestión de residuos peligrosos en Mendoza, ya que es ese conjunto de normas el que define las obligaciones de los generadores y los alcances del control que puede ejercer el ente regulador. A continuación, se caracteriza el aceite lubricante usado como residuo peligroso específico, describiendo su origen, composición y propiedades de peligrosidad, dado que conocer el residuo que se pretende controlar es condición necesaria para diseñar cualquier herramienta de verificación. Finalmente, se presentan los fundamentos de la teoría del balance de masas y su aplicación a la trazabilidad ambiental, que constituyen la base metodológica sobre la que se construye el modelo de estimación de generación esperada.

Los tres ejes no son independientes entre sí. El marco legal establece la obligación de declarar y controlar; la caracterización del residuo define qué parámetros técnicos son relevantes para esa declaración; y el balance de masas proporciona la herramienta que permite contrastar lo declarado con lo que debería haberse generado. Es esa articulación entre lo normativo, lo técnico y lo metodológico la que le da sustento al protocolo de control que se desarrolla en los capítulos siguientes.

A. MARCO LEGAL Y NORMATIVO

La gestión de los residuos peligrosos en Argentina se articula a través de un sistema normativo que involucra distintos niveles jurisdiccionales: el nacional, el provincial y, en ciertos casos, el municipal. Comprender ese entramado legal es fundamental para este trabajo, ya que son precisamente esas normas las que definen quiénes tienen la obligación de declarar los residuos que generan, con qué frecuencia, ante qué organismos y bajo qué consecuencias en caso de incumplimiento. A continuación, se describe cada uno de los instrumentos que enmarcan la gestión de aceites lubricantes usados en el sector vial de la provincia de Mendoza.

1. Ley Nacional N°24.051 – Régimen de Residuos Peligrosos y su Decreto Reglamentario N°831/93

La Ley N°24.051, sancionada en diciembre de 1991 y promulgada en enero de 1992, constituye el pilar del sistema nacional de gestión de residuos peligrosos. Su objeto es regular la generación, manipulación, transporte, tratamiento y disposición final de este tipo de residuos en todo el territorio nacional, siendo de aplicación directa en situaciones que involucren interjurisdiccionalidad o cuando la provincia no haya dictado legislación propia equivalente.

Uno de los aspectos más relevantes para este trabajo es la forma en que la ley define qué es un residuo peligroso. Considera como tales a aquellos que, por sus características físicas, químicas o biológicas,

puedan causar daños directos o indirectos a la salud humana o al medio ambiente. Bajo esa definición, los aceites lubricantes usados quedan expresamente incluidos en el Anexo I de la norma, en la categoría Y8, correspondiente a aceites minerales usados no aptos para el uso al que estaban destinados. Esta categorización obliga a las empresas viales que utilizan maquinaria pesada a tratar sus aceites de desecho como residuos peligrosos, con todas las implicancias que eso conlleva: almacenamiento diferenciado, transporte por operadores habilitados, uso obligatorio del Manifiesto y disposición final controlada.

La ley también crea el Registro Nacional de Generadores y Operadores de Residuos Peligrosos, de inscripción obligatoria para todos los actores de la cadena. Junto con ello, introduce en su Art. 18 el Manifiesto de Residuos Peligrosos como instrumento central de trazabilidad: un documento que debe acompañar cada movimiento de residuos desde el punto de generación hasta el destino final autorizado. Actualmente, este sistema fue modernizado a través del sistema SIMEL (Sistema de Manifiestos Electrónicos), que permite la carga y seguimiento digital del manifiesto por parte de generadores, transportistas y operadores, mejorando el monitoreo de la cadena de custodia.

Desde el punto de vista de la responsabilidad, la ley adopta el principio de responsabilidad objetiva y solidaria del generador. Quien produce el residuo no puede desligarse de su obligación simplemente entregándolo a un transportista habilitado: la responsabilidad se mantiene a lo largo de toda la cadena de manejo. Este principio es jurídicamente potente, pero su efectividad práctica depende de los mecanismos de control con que cuenten los organismos reguladores para verificar la información declarada.

El Decreto Reglamentario N°831/93 operativiza los procedimientos de inscripción, las categorías de residuos del Anexo I, las características de peligrosidad del Anexo II y los parámetros técnicos para el transporte y la disposición final.

En materia de sanciones, la norma prevé multas administrativas, suspensión o cancelación de habilitaciones y responsabilidad penal en casos de contaminación grave. A pesar de ese régimen sancionatorio, la subdeclaración sigue siendo una práctica extendida, en parte porque los organismos de control no siempre cuentan con herramientas técnicas para detectarla. Esa brecha entre el marco normativo y la capacidad real de verificación es precisamente el punto de partida de este trabajo.

2. Ley Provincial N°5.917/92 y Decreto Reglamentario N°2.625/99

La provincia de Mendoza adhirió al régimen de la Ley N°24.051 mediante la Ley Provincial N°5.917, sancionada en 1992. A través de esta adhesión, Mendoza acepta la aplicación del marco normativo nacional en su territorio y delega en las autoridades provinciales las funciones de fiscalización, habilitación y control sobre generadores, transportistas y operadores.

La reglamentación operativa de esta ley se instrumenta a través del Decreto Provincial N°2.625/99, publicado en el Boletín Oficial el 8 de febrero de 2000, posteriormente modificado por el Decreto N°851/2002 y por el Decreto N°212/2010. Este decreto constituye la norma técnica de referencia más importante a nivel provincial para el presente trabajo, ya que regula en detalle: los procedimientos de inscripción en el Registro Provincial de Generadores, Transportistas y Operadores de Residuos Peligrosos; las condiciones mínimas de almacenamiento transitorio en el predio del generador; los

requisitos del Manifiesto de residuos peligrosos a nivel provincial; y las categorías de residuos peligrosos aplicables en Mendoza, entre las que se encuentran, por supuesto, los aceites lubricantes usados correspondientes a la corriente Y8.

La autoridad de aplicación en materia ambiental dentro de la provincia es la Dirección de Gestión y Fiscalización Ambiental (DGFA), dependiente del Ministerio de Energía y Ambiente. En la práctica, los generadores de residuos peligrosos radicados en Mendoza deben inscribirse en el Registro Provincial, obtener su Certificado de Habilitación Ambiental y presentar una declaración jurada anual en la que informan los volúmenes de cada tipo de residuo peligroso generados durante el período. Es en este mecanismo declarativo donde se concentra la principal debilidad que da origen al problema de investigación: el sistema se apoya exclusivamente en lo que el generador informa, sin que exista un procedimiento técnico estandarizado que permita contrastar esa información con la generación esperada en función de la actividad real de la empresa.

3. Resoluciones Provinciales sobre el Registro de Generadores y Operadores In Situ

Más allá del decreto reglamentario, la Secretaría de Medio Ambiente de Mendoza dictó resoluciones específicas que complementan el sistema. La más relevante para este trabajo es la Resolución N°667/08, que establece el procedimiento específico para la inscripción en el Registro Provincial de Generadores, Transportistas y Operadores de Residuos Peligrosos, e introduce la figura del Operador In Situ: aquel que trata sus propios residuos dentro del predio donde los genera, sin necesidad de trasladarlos a una planta externa. Esta figura es relevante para algunas empresas viales de gran escala que realizan tratamientos preliminares de sus aceites usados en sus propios talleres.

Posteriormente, la Resolución N°542/11 modificó el artículo 3° de la Resolución 667/08, especificando los requisitos de la llamada "prueba piloto" que debe realizar una empresa para acreditar la eficacia de su método de tratamiento in situ antes de obtener la habilitación definitiva como operador. Esta resolución establece, entre otros puntos, que una vez finalizada la prueba piloto la empresa tiene 90 días para presentar los certificados de destrucción de los residuos generados durante la misma, y que el incumplimiento habilita la aplicación del régimen sancionatorio previsto en la Ley N°5.961.

Ambas resoluciones tienen vigencia directa sobre el tipo de empresas que analiza este trabajo, ya que definen los canales formales a través de los cuales se declara la generación de residuos peligrosos y se acredita su correcto tratamiento o disposición final.

4. Ley Provincial N°5.961/92 – Ley General del Ambiente de Mendoza

La Ley N°5.961, sancionada también en 1992 y reglamentada mediante el Decreto N°2.109/94 (modificado por el Decreto N°809/13), es la norma ambiental general de la provincia de Mendoza. Establece el marco para la preservación del medio ambiente y el equilibrio ecológico en todo el territorio provincial, y crea el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) como herramienta obligatoria para las obras y actividades que puedan causar impactos significativos.

Su relevancia para este trabajo es doble. Por un lado, la Ley 5.961 es el instrumento bajo cuyo amparo la DGFA ejerce su poder de policía ambiental: es la norma que habilita las inspecciones, las auditorías

y la aplicación de sanciones a los generadores de residuos peligrosos que incumplan sus obligaciones. Por otro lado, el Anexo I de la ley incluye expresamente las intervenciones edilicias, aperturas de calles y remodelaciones viales entre las actividades sometidas al procedimiento de EIA, lo que significa que las obras viales de cierta envergadura deben contar con una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) que, en teoría, contempla la gestión de los residuos peligrosos generados durante la ejecución de los trabajos. En la práctica, esto crea una conexión normativa entre el sistema de residuos peligrosos y el sistema de habilitación ambiental de obras, que el modelo de control propuesto en este trabajo puede aprovechar.

5. Marco Nacional Complementario: Decreto N°831/93 y Ley N°25.675 – Ley General del Ambiente

A nivel nacional, el Decreto N°831/93 es el reglamento de la Ley N°24.051 y fija los parámetros técnicos para la clasificación de residuos, las concentraciones límite que determinan la peligrosidad de una sustancia y los procedimientos para el transporte y la disposición final. Es la norma de referencia técnica obligada para cualquier trabajo que aborde la gestión de residuos peligrosos en Argentina, ya que el Decreto 2.625/99 de Mendoza se apoya sobre sus definiciones y categorías.

Por su parte, la Ley N°25.675/02, conocida como Ley General del Ambiente, establece los presupuestos mínimos para la gestión sustentable y adecuada del ambiente en todo el territorio nacional. Si bien no regula específicamente los residuos peligrosos, introduce principios que tienen aplicación directa en este trabajo: el principio de prevención, que obliga a actuar antes de que se produzca el daño ambiental; el principio precautorio, que exige tomar medidas ante la incertidumbre sobre el impacto de una actividad; y el principio de responsabilidad, que establece que quien genera un daño ambiental debe repararlo. Estos principios sustentan conceptualmente la necesidad de contar con herramientas de control técnico que permitan anticipar y detectar irregularidades en la gestión de aceites usados, antes de que se traduzcan en daño ambiental concreto.

6. Síntesis del Marco Normativo y brecha identificada

Del análisis del conjunto normativo descripto puede concluirse que Argentina, y Mendoza en particular, cuenta con un marco legal relativamente completo para la gestión de residuos peligrosos. En el caso específico de los aceites lubricantes usados generados en empresas viales, ese marco cubre desde la definición de su carácter peligroso (Y8) hasta los procedimientos para su almacenamiento, transporte con Manifiesto y disposición final por operadores habilitados e inscriptos en el Registro Provincial.

Sin embargo, ese mismo marco presenta una brecha estructural que este trabajo se propone abordar: ninguna de las normas analizadas contempla un mecanismo técnico que permita a los organismos reguladores verificar si los volúmenes declarados por un generador son consistentes con su actividad real. La Ley 5.917 y el Decreto 2.625/99 exigen la declaración jurada anual, pero no establecen parámetros de referencia para validarla. La Resolución 667/08 regula los procedimientos de

inscripción y la figura del operador in situ, pero no incorpora herramientas de estimación de generación esperada. La Ley 5.961 habilita las inspecciones, pero sin un modelo técnico de referencia, el inspector no puede determinar si una declaración es verosímil o no.

Esa es la función que cumple el modelo técnico que se desarrolla en los capítulos siguientes: traducir los datos de maquinaria, horas de operación y frecuencia de service en un indicador de generación esperada de aceites usados, que el ente regulador pueda utilizar como parámetro objetivo de control en el marco de los procedimientos que las normas ya vigentes le habilitan.

B. NORMATIVA INTERNACIONAL

La Norma ISO 14001:2015, cuya vigencia en el ámbito del sector vial fue descripta en el punto 4.1.5, no se limita a establecer buenas prácticas de gestión ambiental de manera genérica. Por el contrario, define requisitos concretos que, analizados en relación con el problema de la subdeclaración de ALU, permiten identificar de qué manera el modelo de control propuesto en este trabajo no solo es útil para el ente regulador externo sino también para las propias empresas que operan bajo un Sistema de Gestión Ambiental certificado o en proceso de certificación.

Cláusula 6.1.2 - Aspectos ambientales significativos

La norma exige que la organización identifique los aspectos ambientales de sus actividades, productos y servicios que tengan o puedan tener un impacto ambiental significativo, considerando una perspectiva de ciclo de vida (ISO, 2015). En el caso de una empresa vial con flota propia de maquinaria pesada, la generación de aceites lubricantes usados es un aspecto ambiental significativo de primer orden: se produce de manera continua, en volúmenes considerables, con alta peligrosidad reconocida por la legislación vigente, y su gestión inadecuada tiene consecuencias ambientales directas y potencialmente graves. La norma también exige que estos aspectos sean comunicados entre los distintos niveles y funciones de la organización.

Sin embargo, identificar el ALU como aspecto significativo no es suficiente si la organización no cuenta con una herramienta que le permita cuantificar cuánto genera realmente. Allí es donde el modelo de balance de masas propuesto en este trabajo se articula directamente con el requisito de la cláusula 6.1.2: la fórmula GRE proporciona precisamente esa cuantificación, basada en datos objetivos del manual del fabricante y en los registros operativos del equipo, sin depender de estimaciones subjetivas o de datos declarados a posteriori.

Cláusula 9.1 - Seguimiento, medición, análisis y evaluación del desempeño

La norma establece que la organización debe hacer seguimiento, medir, analizar y evaluar su desempeño ambiental, determinando qué necesita seguimiento y medición, qué métodos aplicar y cuándo analizar y evaluar los resultados (ISO, 2015). Este requisito demanda la existencia de indicadores de desempeño ambiental concretos y medibles.

La GRE calculada por el modelo constituye exactamente ese tipo de indicador: un valor de referencia técnicamente fundamentado que permite a la organización comparar su generación real documentada en manifiestos con la generación esperada según sus parámetros operativos. Si la organización lleva ese seguimiento de manera sistemática, no solo cumple con el requisito de la cláusula 9.1 sino que además dispone de evidencia documental para demostrar ante una auditoría externa que sus declaraciones de residuos son consistentes con su actividad real. Eso convierte al modelo en una herramienta de cumplimiento normativo interno, no solo de control regulatorio externo.

Cláusula 10 - Mejora continua

La norma exige que la organización mejore continuamente la conveniencia, adecuación y eficacia de su Sistema de Gestión Ambiental (ISO, 2015). En el contexto de la gestión de ALU, la mejora continua implica reducir progresivamente las brechas entre la generación esperada y la generación declarada, optimizar los procedimientos de almacenamiento y retiro de residuos, y fortalecer la trazabilidad documental a lo largo del tiempo.

El modelo propuesto contribuye a ese proceso de mejora de una manera concreta: al aplicarse de manera sistemática período a período, permite identificar tendencias, detectar desvíos recurrentes en equipos específicos y evaluar si las acciones correctivas implementadas han producido resultados observables en los indicadores de generación. Esa función de seguimiento longitudinal es precisamente lo que la cláusula 10 de la norma demanda y lo que el modelo puede proveer con los datos que ya están disponibles en los registros operativos de cualquier empresa vial organizada.

De este análisis surge que el modelo de control propuesto en este trabajo tiene una doble utilidad que refuerza su relevancia práctica. Por un lado, es una herramienta para el ente regulador provincial, que le permite pasar de un control pasivo a un control activo tal como se desarrolla en el punto 4.3.5. Por otro lado, es una herramienta para las propias empresas que operan bajo la ISO 14001, que les permite cumplir con los requisitos de identificación y cuantificación de aspectos ambientales significativos, evaluación del desempeño y mejora continua con un instrumento simple, verificable y basado en datos propios. En ambos casos, el beneficio final es el mismo: mayor trazabilidad, menor riesgo ambiental y un sistema de gestión de residuos peligrosos más confiable y transparente.

CAPITULO III

MAQUINARIA VIAL Y OBRADOR

El modelo de control propuesto en este trabajo opera sobre datos técnicos de la maquinaria pesada autopropulsada que compone el parque productivo de una empresa vial. Para que ese modelo sea comprensible, aplicable y verificable, es necesario conocer con precisión qué tipo de equipos se utilizan en las obras viales, cómo se clasifican, cuáles son sus características técnicas relevantes desde el punto de vista de la generación de aceites lubricantes usados, y de qué manera esos parámetros se extraen de los manuales técnicos de los fabricantes.

Este capítulo cumple esa función. Presenta la tipología de maquinaria vial relevante para el modelo, describe las características técnicas de cada categoría de equipo, explica el rol que cada sistema de lubricación cumple en la generación de ALU y justifica la selección de los diez equipos que componen el parque simulado utilizado en la aplicación del protocolo. No se trata de un inventario exhaustivo de toda la maquinaria existente en el sector, sino de una caracterización técnica orientada a fundamentar las decisiones del modelo: por qué se trabaja con el aceite de motor como variable de estimación principal, por qué los equipos seleccionados son representativos del sector vial mendocino y por qué los parámetros extraídos de los manuales son el dato de base más sólido disponible para el protocolo.

A. CLASIFICACIÓN DE LA MAQUINARIA VIAL

La maquinaria utilizada en obras viales puede clasificarse en función de la tarea que realiza dentro del proceso constructivo. En una obra vial típica (sea de construcción de nueva traza, repavimentación, mantenimiento rutinario o rehabilitación) intervienen de manera secuencial equipos de distintas categorías, cada una con características técnicas propias que determinan su consumo de lubricantes y su frecuencia de mantenimiento.

1. Equipos de movimiento de suelos y preparación de base

Son los primeros en intervenir en una obra vial. Su función es excavar, empujar, cargar y transportar el material del terreno para conformar la plataforma sobre la que se construirá la calzada. En esta categoría se incluyen, por ejemplo, las motoniveladoras, que conforman y nivelan la superficie de la plataforma con precisión mediante una cuchilla central orientable; las retroexcavadoras, que excavan zanjas y movilizan material con un brazo articulado posterior; y las cargadoras frontales, que cargan el material excavado sobre camiones volcadores para su transporte. Estos equipos trabajan a plena carga de manera continua, frecuentemente en entornos de alta concentración de polvo y a temperaturas extremas, condiciones que los fabricantes clasifican sistemáticamente como de uso severo y que, conforme al criterio adoptado en este trabajo, justifican la aplicación del Factor de Condición Operativa.

2. Equipos de compactación

Una vez conformada la plataforma y extendidas las capas de material, se requiere su compactación para alcanzar la densidad especificada en el proyecto. En esta categoría se distinguen los rodillos vibratorios de tambor liso (como el HAMM HD 90), utilizados para compactar capas granulares y mezclas asfálticas; los compactadores neumáticos (como el HAMM GRW 280), cuyas ruedas de goma aplican una presión amásante especialmente eficaz para la compactación de suelos cohesivos y mezclas asfálticas; y las mini cargadoras con accesorios de compactación, que permiten operar en espacios reducidos. Los compactadores trabajan de manera repetitiva sobre la misma superficie, con cargas elevadas y frecuentes paradas y arranques que someten al motor a ciclos térmicos exigentes.

3. Equipos de pavimentación

Son los responsables de extender y conformar la capa asfáltica sobre la base compactada. La terminadora asfáltica (como la VOGELE Super 1800-3) es el equipo central de esta categoría: recibe la mezcla asfáltica desde camiones volcadores, la distribuye uniformemente sobre la calzada mediante una extensión transversal y la precompacta con vibradores y apisonadores integrados. La terminadora opera de manera continua a velocidad de avance constante, lo que implica un régimen de carga sostenida del motor durante toda la jornada de trabajo.

4. Equipos de fresado y demolición de pavimento

La fresadora de pavimento (como la WIRTGEN W 100) es el equipo utilizado para retirar capas de pavimento deteriorado mediante un tambor giratorio con puntas de carburo de tungsteno. Opera a cargas muy elevadas y en condiciones de alta vibración y calor generado por el proceso de fresado, lo que hace al motor especialmente susceptible a la degradación acelerada del lubricante bajo condiciones de uso severo.

5. Equipos auxiliares y de servicio

Complementan las operaciones de obra con funciones específicas. En esta categoría se incluyen los manipuladores telescópicos (como el BOBCAT T40140), que facilitan el movimiento de materiales y equipos en el obrador; las mini cargadoras (como la BOBCAT S130), polivalentes en espacios reducidos; y las perforadoras, utilizadas en trabajos de señalización vertical, barreras y fundaciones de obras de arte.

B. SISTEMAS DE LUBRICACIÓN EN LA MAQUINARIA VIAL Y SU RELACIÓN CON LA GENERACIÓN DE ALU

Cada equipo de maquinaria pesada opera con múltiples sistemas de lubricación que funcionan de manera simultánea e independiente durante la operación. Cada uno de esos sistemas tiene su propio fluido de trabajo, su propia capacidad volumétrica, su propia tasa de degradación y su propia frecuencia de cambio recomendada por el fabricante. La comprensión de esa arquitectura de lubricación es el fundamento técnico del modelo de estimación: para saber cuánto ALU genera un equipo, es necesario entender primero qué fluidos contiene, en qué volúmenes y con qué frecuencia deben renovarse.

En la maquinaria vial pesada pueden identificarse cuatro sistemas de lubricación principales que contribuyen a la generación de ALU: el sistema de lubricación del motor, el sistema hidráulico, el sistema de transmisión y mandos finales, y los sistemas de lubricación auxiliares de componentes específicos. Cada uno presenta características técnicas, grados de estandarización y niveles de documentación distintos, lo que determina su utilidad diferencial como variable de estimación en un modelo de control aplicable en campo.

1. Sistema de lubricación del motor

El sistema de lubricación del motor es el más relevante para los fines del modelo y el que se ha seleccionado como variable de estimación central. Su función es garantizar que todos los componentes internos del motor diésel que están en movimiento relativo operen con una película de aceite entre sus superficies, evitando el contacto metal con metal, disipando el calor generado por la combustión y la fricción, y manteniendo el interior del motor limpio mediante la suspensión y transporte de partículas contaminantes hacia el filtro de aceite (Vázquez-Duhalt, 1989).

Los componentes internos lubricados por este sistema incluyen el cigüeñal y sus cojinetes de bancada y biela, las bielas, los pistones y los anillos de compresión y de control de aceite, el árbol de levas y los balancines, el sistema de distribución de válvulas, la bomba de inyección de combustible y, en muchos motores modernos, el turbocompresor (que opera a velocidades de hasta 150.000 rpm y es especialmente sensible a la calidad y presencia del lubricante). La bomba de aceite, accionada por el cigüeñal, hace circular el fluido desde el cárter a través del filtro y hacia todos esos puntos de lubricación en un circuito cerrado y continuo durante toda la operación del motor.

El aceite de motor nuevo es un producto relativamente estable, formulado con aceite base (mineral, semisintético o sintético) y un paquete de aditivos que incluye detergentes, dispersantes, antidesgaste (típicamente ZDDP, dialquilditiofosfato de zinc), antioxidantes, mejoradores de viscosidad y modificadores de fricción (Vázquez-Duhalt, 1989). Durante la operación, ese aceite se somete a un proceso de degradación progresiva e irreversible que reduce su capacidad de cumplir sus funciones protectoras.

Los mecanismos de degradación son múltiples y actúan de manera simultánea. La oxidación térmica ocurre cuando el aceite se expone a las altas temperaturas del motor (el aceite en el cárter de un motor diésel en plena carga puede alcanzar entre 120°C y 150°C) provocando la rotura de las cadenas hidrocarbonadas del aceite base y la formación de compuestos oxidados que aumentan la viscosidad del fluido y generan depósitos en las superficies internas del motor. La contaminación por productos de combustión introduce en el aceite hollín, partículas de carbono y agua de condensación que saturan la capacidad dispersante del fluido. La contaminación metálica incorpora partículas de hierro, cromo, aluminio, cobre y plomo provenientes del desgaste normal de los componentes internos. El agotamiento de los aditivos, finalmente, elimina progresivamente la capacidad del aceite de neutralizar ácidos, dispersar contaminantes y proteger contra el desgaste.

En condiciones de uso vial severo (alta temperatura ambiente, polvo en suspensión, operación a plena carga sostenida) estos mecanismos se aceleran significativamente. El polvo que penetra al motor a través del sistema de admisión de aire actúa como abrasivo, incrementando el desgaste metálico y la contaminación del aceite a tasas superiores a las que los fabricantes contemplan en sus intervalos de cambio estándar. Por esa razón, los fabricantes de maquinaria pesada que opera en condiciones de construcción vial establecen explícitamente en sus manuales técnicos intervalos de cambio reducidos para condiciones de uso severo, típicamente a la mitad del intervalo estándar.

La capacidad del cárter de motor varía significativamente según el tamaño y la potencia del equipo: desde los 8,1 litros de la Mini Cargadora BOBCAT S130, equipada con un motor Kubota de 33 kW, hasta los 28,5 litros de la Cargadora Frontal LIUGONG CLG856, equipada con un motor Cummins 6CT8.3 de 162 kW. El intervalo de cambio estándar para motores diésel de maquinaria pesada en el parque simulado se ubica en 500 horas para nueve de los diez equipos, y en 250 horas para la Mini Cargadora BOBCAT S130, cuyo motor de menor cilindrada requiere renovación más frecuente del lubricante según especificación del fabricante.

En términos de grado SAE y clasificación API, los motores diésel de maquinaria pesada utilizan predominantemente aceites 15W-40 en formulaciones minerales o 10W-40 en semisintéticos y sintéticos, con clasificación API CK-4 o CJ-4 según la generación del motor y los requisitos de control de emisiones. Algunos fabricantes, como Caterpillar con su línea de motores ACERT, especifican además fluidos propietarios o con aprobaciones particulares que pueden influir en el intervalo de cambio permitido.

El aceite de motor es la variable elegida como base del modelo por cuatro razones técnicas que se refuerzan mutuamente.

a. Universalidad:

El sistema de lubricación del motor está presente en todos los equipos del parque sin excepción, independientemente del tipo de maquinaria, el fabricante, la potencia o la tecnología de transmisión. Una cargadora y una terminadora asfáltica pueden tener sistemas hidráulicos radicalmente distintos, pero ambas tienen un motor diésel con cárter de aceite y un programa de service basado en horas de horómetro.

b. Frecuencia y volumen acumulado:

El aceite de motor es el fluido que se cambia con mayor periodicidad (cada 250 a 500 horas en condiciones normales, cada 125 a 250 horas en condiciones severas) lo que significa que en un año de operación intensiva un equipo puede realizar entre 7 y 14 cambios de aceite de motor, acumulando el mayor volumen de ALU generado por un equipo individual a lo largo del tiempo.

c. Documentación técnica:

El aceite de motor es el parámetro mejor documentado en los manuales técnicos de los fabricantes. Todos los manuales relevados en este trabajo incluyen una sección específica de lubricación del motor con la capacidad del cárter expresada en litros, el intervalo de cambio

en horas para condiciones normales y severas, la clasificación API requerida y el grado SAE recomendado. Esa disponibilidad y consistencia de la información técnica hace al dato objetivamente verificable por cualquier inspector.

d. **Sistematicidad de los registros operativos:**

El service del motor es la intervención de mantenimiento más frecuente y económicamente más relevante en la operación de maquinaria pesada, lo que hace que las empresas viales lleven registros de esas intervenciones de manera sistemática como parte de su gestión del parque. Las órdenes de trabajo del taller, las facturas de aceite y filtros, y las anotaciones en el libro de service de cada equipo constituyen evidencia documental de cada cambio realizado, lo que facilita tanto el relevamiento por parte del modelo como la verificación cruzada por parte del inspector.

2. Sistema hidráulico

El sistema hidráulico es el segundo mayor generador de ALU en la maquinaria vial pesada, tanto en términos de capacidad volumétrica por equipo como de impacto potencial sobre el volumen total de residuo generado. Su función es la transmisión de potencia mecánica mediante un fluido a presión, que activa los cilindros hidráulicos, los motores hidráulicos y las válvulas de control responsables del movimiento de los brazos, baldes, cilindros de inclinación, sistemas de dirección articulada y mecanismos de extensión de las terminadoras asfálticas, entre otros sistemas.

Los sistemas hidráulicos de maquinaria pesada utilizan predominantemente aceites de base mineral con clasificación ISO VG 46 o ISO VG 68, seleccionados en función de la temperatura de operación y los requisitos de viscosidad del sistema. En algunos equipos de alta tecnología, los fabricantes especifican fluidos hidráulicos biodegradables o de síntesis específica para condiciones de operación extremas. Los depósitos hidráulicos en maquinaria pesada tienen capacidades significativamente mayores que los cárteres de motor: una retroexcavadora de tamaño mediano puede contener entre 60 y 120 litros de aceite hidráulico, una cargadora frontal de gran porte puede superar los 150 litros, y una topadora de alta potencia puede alcanzar los 200 litros o más en su depósito hidráulico principal (Caterpillar Inc., 2017; NEW HOLLAND Agriculture & Construction, 2016).

Los intervalos de cambio del aceite hidráulico se ubican generalmente entre 1.000 y 2.000 horas de operación, aunque en equipos modernos con sistemas de filtración de alta eficiencia y aceites sintéticos algunos fabricantes extienden ese intervalo hasta las 4.000 horas. Sin embargo, la mayoría de los fabricantes recomiendan realizar análisis periódicos del aceite hidráulico en servicio (determinando viscosidad, contenido de partículas, concentración de agua y presencia de metales de desgaste) para ajustar el intervalo de cambio a las condiciones reales de operación del equipo.

A pesar del volumen significativo de ALU que genera, el sistema hidráulico presenta dos limitaciones que dificultan su incorporación a un modelo universal de estimación aplicable en campo.

a. **Heterogeneidad estructural entre tipos de equipos:**

Mientras una cargadora frontal o una retroexcavadora tienen un depósito hidráulico claramente diferenciado con una capacidad nominal definida en el manual, equipos como los

compactadores neumáticos o los rodillos vibratorios utilizan sistemas hidrostáticos integrados en los que el circuito hidráulico de la transmisión y el circuito de los accesorios comparten el mismo fluido y el mismo depósito, cuya capacidad varía según la configuración del equipo. Aplicar una lógica uniforme de estimación sobre sistemas tan heterogéneos introduciría una incertidumbre metodológica que debilitaría la solidez del modelo.

b. Limitación es la menor sistematicidad de los registros:

En muchas empresas viales de mediana escala, el service del sistema hidráulico no se realiza con la misma regularidad ni con el mismo nivel de documentación que el service del motor, precisamente porque su intervalo más largo lo hace menos visible en la planificación cotidiana del mantenimiento. Esa menor sistematicidad de los registros reduce la verificabilidad del dato en un contexto de inspección de campo.

Por estas razones, el sistema hidráulico queda fuera del alcance del modelo propuesto, lo que refuerza directamente su carácter de estimación mínima: la *GRE* calculada representa el piso de lo que la empresa debería haber declarado considerando solo el sistema de motor, y la generación real total del equipo es siempre mayor que ese valor. La incorporación del sistema hidráulico queda planteada como extensión natural del protocolo en futuras versiones del modelo.

3. Sistema de transmisión y mandos finales

El sistema de transmisión y mandos finales es responsable de lubricar la cadena de transmisión de potencia desde el motor hasta las ruedas o cadenas del equipo, incluyendo la caja de velocidades o convertidor de par, los diferenciales, los ejes y los mandos finales planetarios que multiplican el torque transmitido a las ruedas motrices o a los sprockets de las cadenas.

Los aceites utilizados en este sistema tienen características muy distintas a los aceites de motor: son fluidos de alta viscosidad formulados para resistir cargas extremas de presión y cizallamiento, clasificados con las normas API GL-4 o GL-5 en grados SAE 80W-90, 85W-140 o, en algunos equipos con mandos finales planetarios de alta reducción, SAE 50 o SAE 60 en formulaciones monogrado. La resistencia a la formación de películas bajo presión extrema (clasificación EP, Extreme Pressure) es la propiedad más crítica de estos fluidos, ya que los engranajes de los diferenciales y mandos finales operan con contactos de alta carga puntual que generan presiones locales de miles de megapascasles.

Los intervalos de cambio en este sistema se ubican generalmente entre 500 y 1.000 horas para las cajas de velocidades y diferenciales, y entre 500 y 2.000 horas para los mandos finales, según el fabricante y el tipo de equipo. En algunos equipos, el fabricante especifica intervalos diferenciados para el primer cambio (frecuentemente a las 500 horas, para retirar las partículas metálicas generadas durante el proceso de rodaje inicial de los engranajes) y para los cambios subsiguientes, con intervalos mayores.

En equipos con mandos finales independientes (como las topadoras o ciertas cargadoras de gran porte), cada mando final puede tener su propio cárter con varios litros de aceite, lo que implica que la sumatoria de todos los cárteres de transmisión y mandos del equipo puede superar ampliamente la

capacidad del cárter de motor. Una topadora DRESSSTA TD-15M, por ejemplo, puede tener entre 8 y 12 litros de aceite en cada mando final, sumados a los 20-30 litros de la caja de cambios, generando un volumen total de aceite de transmisión que puede duplicar la capacidad del cárter de motor.

Las mismas razones de heterogeneidad estructural que aplican al sistema hidráulico son válidas para el sistema de transmisión y mandos finales, con una complejidad adicional: en este caso la variabilidad no solo se da entre distintos tipos de equipos sino también dentro del mismo equipo, donde los distintos subsistemas (caja de velocidades, diferencial central, mandos finales izquierdo y derecho) pueden tener capacidades, fluidos e intervalos de cambio distintos que aparecen desagregados en distintas secciones del manual técnico. Sistematizar esa información en un protocolo de inspección de campo aplicable por un inspector con formación técnica básica requeriría un nivel de detalle que excede el alcance operativo del modelo propuesto.

Adicionalmente, la variabilidad de los fluidos especificados por distintos fabricantes es mayor en este sistema que en el sistema de motor: mientras que la mayoría de los fabricantes de motores diésel acepta aceites con clasificación API CJ-4 o CK-4 en grado 15W-40, los sistemas de transmisión tienen especificaciones propietarias en varios fabricantes (Caterpillar especifica su fluido TDTO, Komatsu su fluido WOS, HAMM sus propias especificaciones de fluidos de transmisión) que no son directamente comparables entre sí y que dificultan la construcción de un factor de estimación universal para este sistema.

4. Sistemas de lubricación auxiliares

Además de los tres sistemas principales, la maquinaria vial pesada incorpora una serie de sistemas de lubricación auxiliares que contribuyen en menor medida a la generación total de ALU pero que forman parte del programa de mantenimiento preventivo de cada equipo.

Entre los más relevantes se encuentran los siguientes:

a. Sistema de lubricación del turbocompresor:

El turbocompresor, presente en prácticamente todos los motores diésel modernos de maquinaria pesada, está lubricado por el mismo aceite del motor que circula a través de sus cojinetes de eje flotante. Aunque no tiene un sistema de lubricación independiente, el turbocompresor es el componente más sensible a la degradación del aceite de motor: sus cojinetes operan a velocidades de rotación extremadamente altas y temperaturas que pueden superar los 700°C en la turbina, lo que acelera la degradación térmica del aceite que los lubrica y es una de las razones técnicas que justifica los intervalos de cambio reducidos bajo condiciones de uso severo.

El ALU generado por el desgaste del turbocompresor se descarga junto con el aceite del cárter en cada cambio y queda incorporado en el volumen estimado por el modelo.

b. Sistema de engrase de articulaciones y rodamientos:

Los puntos de articulación, pasadores, bujes y rodamientos de los brazos, baldes, cilindros y mecanismos de dirección de la maquinaria pesada se lubrican mediante grasas (en la mayoría de los casos, grasas de litio o polietileno en consistencias NLGI 2) aplicadas periódicamente

mediante engrasadoras manuales o sistemas centralizados de engrase automático. La cantidad de grasa consumida por lubricación de articulaciones es relativamente pequeña en términos volumétricos individuales, pero puede acumular un volumen significativo en equipos con muchos puntos de engrase a lo largo de un año de operación. Esta grasa usada no se recupera como fluido, sino que se expulsa de los puntos de lubricación por presión del material nuevo, contaminando el suelo del área de trabajo si no se adoptan medidas de contención. Aunque su gestión como residuo peligroso está contemplada en el mismo marco normativo que el ALU, queda fuera del modelo de estimación por la dificultad de cuantificar su volumen de manera verificable en campo.

c. Sistema de lubricación de la muela de la fresadora:

En el caso específico de las fresadoras de pavimento, el tambor de fresado (que puede superar los 1.000 mm de ancho de trabajo en equipos grandes) utiliza un sistema de lubricación propio para los cojinetes del eje del tambor, separado del sistema hidráulico y del motor. Este sistema utiliza aceite de cojinetes de alta viscosidad y tiene su propio programa de mantenimiento con intervalos definidos por el fabricante. En la WIRTGEN W 100, por ejemplo, el manual técnico especifica revisiones y cambios periódicos del aceite del accionamiento del tambor que generan un volumen adicional de ALU que no está incluido en la estimación del modelo.

5. Síntesis comparativa de los sistemas de lubricación

La tabla que se presenta a continuación resume las características principales de los cuatro sistemas de lubricación identificados en la maquinaria vial pesada, permitiendo visualizar de manera integrada por qué el sistema de lubricación del motor es el más adecuado como variable de estimación del modelo y por qué los sistemas restantes quedan fuera de su alcance actual.

Tabla 1. Comparación de sistemas de lubricación en maquinaria vial pesada

CARACTERÍSTICA	MOTOR	HIDRAÚLICO	TRANSMISIÓN Y MANDOS	AUXILIARES
Presencia en equipos	UNIVERSAL	VARIABLE	VARIABLE	PARCIAL (según tipo)
Capacidad de volumen	BAJO 8 — 30 litros	ALTO 60 — 200 litros	MEDIO 10 — 80 litros (suma subsistemas)	VARIABLE
Previsibilidad de cambio (condiciones normales)	ALTA 250 — 500hs	MEDIA 1.000 — 2.000hs	MEDIA 500 — 1.000hs	BAJA/VARIABLE
Previsibilidad de cambio (condiciones severas)	ALTA 125 — 250hs	MEDIA 500 — 1.000hs	MEDIA/BAJA (sin ajuste estándar generalizado)	BAJA/VARIABLE
Documentación técnica	DETALLADA (siempre disponible)	DISPONIBLE (variable en detalle)	DESAGREGADA	PARCIAL
Sistematicidad de registros en empresa	ALTA	MEDIA	MEDIA/BAJA	BAJA

Estandarización entre fabricantes	ALTA <i>(clasificación API unificada)</i>	MEDIA	BAJA <i>(fluidos propietarios frecuentes)</i>	MUY BAJA
Verificabilidad en inspección de campo	ALTA	MEDIA	BAJA/MEDIA	BAJA
ESTATUS EN EL MODELO	INCLUIDO	EXCLUIDO	EXCLUIDO	EXCLUIDO

Fuente: Elaboración propia en base a Tchobanoglous et al. (1994), Vázquez-Duhalt (1989) y manuales técnicos de fabricantes citados en la Bibliografía.

La lectura de esta tabla pone en evidencia que el sistema de lubricación del motor no es solo la opción más conveniente para el modelo: es la única que reúne simultáneamente los cuatro atributos que un modelo de estimación aplicable en campo requiere en sus variables de base (universalidad, documentación completa, estandarización entre fabricantes y alta verificabilidad). Los sistemas restantes pueden generar volúmenes individuales de ALU iguales o mayores al del motor en algunos equipos específicos, pero ninguno de ellos puede ser estimado con la misma solidez metodológica a partir de datos verificables de manera independiente en una inspección de campo rutinaria.

Esta restricción deliberada del modelo al sistema de motor no es una limitación que debilite su utilidad, es una garantía de su solidez operativa.

Un modelo que solo puede aplicarse a equipos específicos o que requiere datos difícilmente verificables no es una herramienta de control; es un ejercicio académico.

El modelo propuesto en este trabajo es aplicable a cualquier empresa vial, sobre cualquier equipo, por cualquier inspector, porque opera exclusivamente con la variable más universal, más documentada y más verificable de todas las que generan ALU en la maquinaria pesada.

C. CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA MAQUINARIA VIAL ESENCIAL

Toda empresa que se dedique al rubro vial mínimamente necesita un parque de equipos que representan la flota básica e indispensable para la ejecución de cualquier obra vial de mediana escala.

La selección no responde a preferencias de marca ni a disponibilidades particulares de un contratista específico, sino a la lógica del proceso constructivo vial: cada equipo cumple una función que no puede ser suplantada por otro dentro de la secuencia de trabajo. Un obrador que cuente con estos tipos de maquinaria está en condiciones de ejecutar desde la preparación de la plataforma hasta la terminación de la carpeta asfáltica, pasando por todos los procesos intermedios de movimiento de suelos, compactación, pavimentación y servicio auxiliar.

La descripción que sigue presenta cada equipo desde su función operativa, sus características técnicas generales y sus parámetros de lubricación del motor, que son los datos que el modelo utiliza como variables de estimación. Las marcas y modelos específicos que se mencionan en algunos casos lo hacen a título de ejemplo ilustrativo, sin que ello implique exclusividad ni preferencia técnica; los

misimos parámetros de lubricación pueden relevarse de los manuales técnicos de cualquier otro fabricante del mismo tipo de equipo.

1. Compactador neumático

También denominado rodillo de ruedas neumáticas o compactador de neumáticos; es el equipo especializado en la compactación de suelos cohesivos, bases granulares tratadas y capas de mezcla asfáltica mediante la presión amásante que ejercen sus neumáticos de alta presión sobre la superficie de trabajo. A diferencia de los rodillos de tambor liso, cuya acción es fundamentalmente vibratoria y de impacto superficial, el compactador neumático genera una deformación progresiva y uniforme del material por amasado, lo que lo hace especialmente eficaz en la compactación de suelos con finos y en la selección de capas intermedias de pavimento donde se requiere densificación en profundidad sin fisurar la superficie.

Constructivamente, el compactador neumático se compone de un bastidor portante sobre el que se montan dos ejes de ruedas neumáticas (típicamente cuatro ruedas en el eje delantero y cinco en el trasero, aunque las configuraciones varían según el fabricante) con una presión de inflado regulable que permite ajustar la presión de contacto rueda-suelo según el tipo de material a compactar. Muchos modelos incorporan un sistema de lastrado hidráulico que permite variar el peso operativo del equipo añadiendo agua, arena u otros materiales al bastidor, incrementando la carga por rueda sin modificar la presión de inflado.

El motor de estos equipos tiene la función exclusiva de propulsar el equipo a las velocidades de trabajo (generalmente entre 3 y 12 km/h) y accionar los sistemas hidráulicos de dirección y lastrado.

Al no tener función de vibrado, el motor trabaja a cargas moderadas y relativamente constantes durante la operación, aunque la frecuencia de paradas y arranques en los ciclos de compactación genera ciclos térmicos que aceleran la degradación del lubricante. La capacidad del cárter de motor en equipos de esta categoría se ubica típicamente entre 10 y 15 litros, con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales y de 250 horas en condiciones de uso severo (HAMM AG, 2019).

Desde el punto de vista de la generación de ALU, el compactador neumático es un equipo de contribución media dentro del parque: su cárter de tamaño moderado y su intervalo estándar de 500 horas producen entre 4 y 7 cambios anuales según la intensidad de uso, con un volumen individual por cambio de entre 10 y 14 litros de ALU.



Gráfico 1 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Compactador Neumático.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://www.wirtgen-group.com/ocs/es-ar/hamm/hd-90-vo-1801-p/>].

2. Rodillo compactador de tambor liso vibratorio

El rodillo compactador de tambor liso (también denominado rodillo tándem cuando tiene dos tambores, uno delantero y uno trasero) es el equipo de compactación final de las capas asfálticas. Trabaja inmediatamente detrás de la terminadora para densificar la mezcla extendida mientras aún se encuentra a temperatura de compactación, cerrando los vacíos entre las partículas de árido y el betún para alcanzar la densidad Marshall especificada en el proyecto.

La acción compactadora del rodillo tándem se basa en la combinación de peso estático y vibración mecánica generada por masas excéntricas giratorias alojadas en los tambores. La frecuencia de vibración (típicamente entre 40 y 60 Hz) y la amplitud de la vibración (que define la energía de compactación por pasada) son parámetros ajustables por el operador según el tipo de mezcla y el espesor de la capa. En las últimas pasadas de compactación, cuando la mezcla ya ha alcanzado su densidad objetivo, el operador desactiva la vibración y opera el rodillo en modo estático para pulir la superficie y eliminar marcas.

El motor del rodillo tándem trabaja a cargas moderadas durante las pasadas de compactación, pero el sistema de vibración impone una demanda energética adicional constante que se traduce en un consumo de combustible y una carga térmica sobre el motor superiores a los que correspondería a un equipo de igual peso sin sistema de vibración. La vibración transmitida al bastidor del equipo puede además afectar la integridad de los sellos y retenes del motor si el mantenimiento preventivo no es riguroso, lo que justifica su inclusión entre los equipos con mayor propensión a las condiciones de uso severo. La capacidad del cárter de motor en rodillos tándem de mediana tonelaje (entre 8 y 14

toneladas métricas) se ubica entre 9 y 13 litros, con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales (HAMM AG, 2018).



Gráfico 2 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Compactador de tambor liso vibratorio.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://www.wirtgen-group.com/ocs/es-ar/hamm/hd-90-vo-1801-p/>].

3. Cargadora frontal de ruedas

La cargadora frontal de ruedas (también denominada pala cargadora o simplemente cargadora) es uno de los equipos de mayor versatilidad y presencia en los obradores viales. Su función principal es la carga de materiales a granel (áridos, suelos, escombros, mezclas granulares) sobre camiones volcadores o sobre cintas transportadoras, mediante un balde frontal articulado accionado hidráulicamente. Adicionalmente, la cargadora frontal se utiliza para el acopio y movimiento de materiales dentro del obrador, la alimentación de plantas de asfalto y trituración, y el despeje de áreas de trabajo.

La cargadora frontal de mediana capacidad (con cubetas de entre 2,5 y 3,5 m³ y pesos operativos de entre 15.000 y 20.000 kg) es el tamaño más frecuente en obras viales provinciales y municipales. Trabaja en ciclos repetitivos de carga, transporte corto, descarga y retorno, con aceleraciones y frenadas constantes que someten al tren de potencia a cargas variables e impulsivas. El motor debe responder a demandas de par máximo durante la penetración del balde en el material, alternadas con períodos de carga reducida durante el transporte y la maniobra, lo que genera un perfil de operación característicamente exigente para el sistema de lubricación.

La capacidad del cárter de motor en cargadoras frontales de mediana capacidad se ubica típicamente entre 18 y 22 litros, con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales y de 250 horas en condiciones de polvo y temperatura elevada. El sistema hidráulico de estos equipos, por su parte, puede contener entre 80 y 150 litros de aceite hidráulico en su depósito principal, lo que ilustra la

magnitud del volumen de ALU adicional que quedaría fuera de la estimación del modelo al no considerar el sistema hidráulico.



Gráfico 3 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Cargadora Frontal Estándar – Capacidad media.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://reymasa.com.ar/producto/cargadora-frontal-xcmg-lw180k-balde-1-m3/>].

4. Cargadora frontal de ruedas

La cargadora frontal de gran capacidad comparte los principios de funcionamiento de su par de mediana capacidad, pero opera en una escala volumétrica y de potencia significativamente mayor. Con cubetas que superan los 4 m³ y pesos operativos que pueden alcanzar los 30.000 kg o más, está diseñada para alimentar plantas de asfalto de alta producción, mover grandes volúmenes de material en áreas de acopio y cargar camiones de gran tonelaje en ciclos de alta productividad.

El motor de estos equipos desarrolla potencias de entre 150 y 220 kW o superiores, lo que se traduce en cárteres de motor con capacidades de entre 25 y 35 litros. Esta mayor capacidad de lubricante tiene una implicancia directa sobre el modelo: en igualdad de número de cambios realizados, una cargadora de gran capacidad genera entre un 50% y un 100% más de ALU por cambio que una cargadora de mediana capacidad. Esa diferencia hace que la correcta identificación de la capacidad nominal del cárter a partir del manual técnico del fabricante sea especialmente crítica para la precisión de la estimación.

Un aspecto técnico relevante de las cargadoras frontales de gran capacidad es que algunos fabricantes especifican intervalos de cambio más cortos que el estándar de 500 horas (en algunos casos, 250 horas incluso en condiciones normales) por la mayor exigencia térmica que impone el funcionamiento a plena carga de motores de alta potencia. Ese es el caso de algunos modelos de la gama alta de fabricantes como XCMG, cuyo manual técnico especifica 250 horas como intervalo estándar para determinadas configuraciones de motor. Cuando ese es el valor del manual, el modelo lo adopta

directamente como $I_{fabricante}$, sin necesidad de aplicar el F_{co} de ajuste por uso severo sobre el intervalo estándar: el fabricante ya ha incorporado esa consideración en su especificación (XCMG Group, 2020).

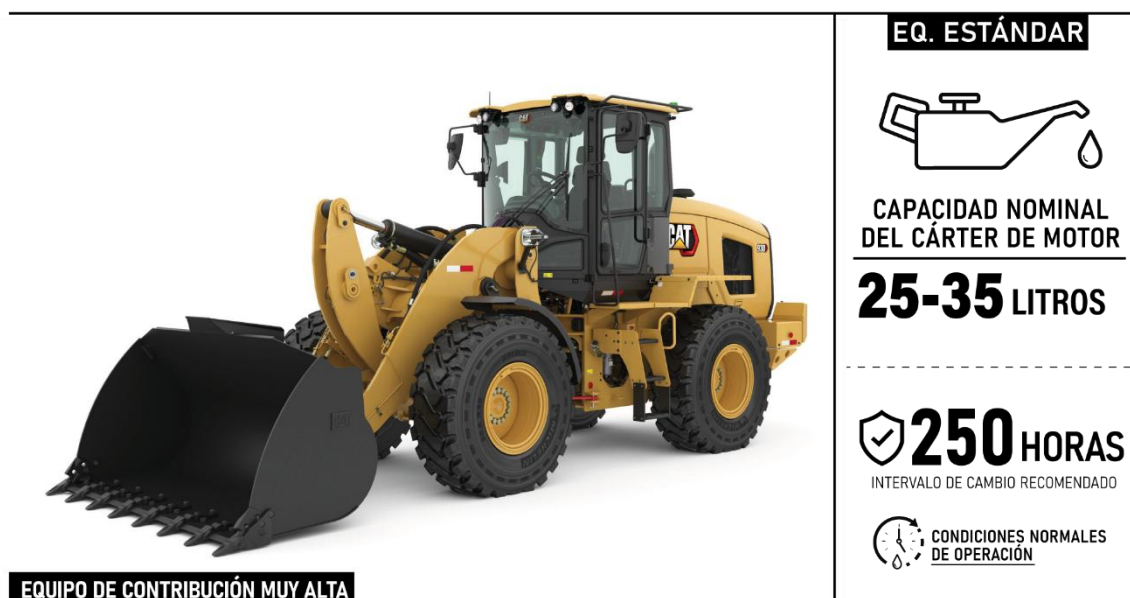


Gráfico 4 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Cargadora Frontal Estándar – Capacidad alta.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [https://www.finning.com/es_AR/productos/nuevos/equipos/cargadores-de-ruedas/cargadores-de-ruedas-pequenos/123920.html].

5. Motoniveladora

La motoniveladora es el equipo de precisión por excelencia en la construcción vial. Su función central es la conformación, nivelación y perfilado de superficies con tolerancias geométricas estrictas, mediante una cuchilla central (denominada hoja o blade) orientable en múltiples ejes que puede inclinarse, girar y desplazarse lateralmente para adaptarse a distintos perfiles de trabajo. Esta versatilidad la hace indispensable en la conformación de la subrasante y las bases granulares de la calzada, el perfilado de taludes y la apertura y mantenimiento de cunetas.

Constructivamente, la motoniveladora se caracteriza por su largo bastidor articulado, que separa el eje delantero de los ejes traseros motorizados por una distancia de entre 6 y 9 metros según el modelo. La hoja se monta en un círculo giratorio ubicado entre los dos ejes, lo que permite su orientación precisa en cualquier dirección de trabajo. Los ejes traseros están equipados con sistemas de tracción tándem (dos ruedas motrices por lado, con mandos finales independientes) que proporcionan la capacidad de tracción necesaria para trabajar en terrenos blandos o en pendiente.

El motor de la motoniveladora trabaja a carga relativamente constante durante las pasadas de nivelación, con variaciones debidas al tipo de suelo y a la profundidad de corte de la hoja. En obras viales, la motoniveladora opera frecuentemente en terrenos con alto contenido de polvo, arena o material pétreo fino, lo que califica su operación como uso severo en la mayoría de las clasificaciones

de los fabricantes. La capacidad del cárter de motor se ubica típicamente entre 14 y 20 litros en motoniveladoras de mediana potencia (entre 100 y 160 kW), con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales y de 250 horas en condiciones severas (Caterpillar Inc., 2017; SANY Group Co., Ltd., 2019).

La presencia de dos motoniveladoras en el parque simulado (de distintos fabricantes y potencias) refleja la realidad habitual de las flotas viales mendocinas, donde la convivencia de equipos de distintas marcas es la norma. El hecho de que ambas tengan el mismo intervalo de fabricante (500 horas) pero capacidades de cárter distintas (15,0 y 18,0 litros) ilustra la importancia de relevar los parámetros equipo por equipo en lugar de asumir valores promedio por tipo de máquina.



Gráfico 5 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Motoniveladora.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://www.ferreyros.com.pe/equipo/140m/>].

6. Terminadora asfáltica

La terminadora asfáltica (también denominada pavimentadora o finisher) es el equipo central del proceso de pavimentación: recibe la mezcla asfáltica caliente desde los camiones volcadores, la distribuye uniformemente sobre la calzada mediante un sistema de distribución transversal y la precompacta con vibradores y apisonadores integrados en la regla de extensión, produciendo una capa de espesor y pendiente controlados lista para la compactación final con rodillos.

El proceso de pavimentación exige que la terminadora opere de manera continua y a velocidad de avance constante (generalmente entre 3 y 8 metros por minuto) para garantizar la uniformidad de la capa extendida y evitar juntas frías. Esa continuidad operativa somete al motor a un régimen de carga sostenida durante toda la jornada de trabajo, que puede extenderse de 8 a 12 horas cuando las condiciones logísticas de provisión de mezcla asfáltica lo permiten. El calor radiante de la mezcla asfáltica (que llega a la terminadora a temperaturas de entre 140°C y 170°C) eleva la temperatura

ambiente alrededor del equipo de manera significativa, lo que constituye una condición adicional de uso severo para el motor y el sistema de lubricación.

La capacidad del cárter de motor en terminadoras asfálticas de mediana producción (aquellas con anchos de trabajo de entre 3 y 9 metros, que son las más frecuentes en obras viales provinciales) se ubica entre 12 y 16 litros, con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales y de 250 horas en condiciones severas (VOGELE - Joseph Vögele AG, 2018). La terminadora es, junto con la motoniveladora, uno de los equipos donde la correcta aplicación del Fco de uso severo tiene mayor incidencia sobre la GRE estimada, dado que sus condiciones operativas reúnen de manera habitual todos los criterios de severidad definidos por los fabricantes.



Gráfico 6 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Terminadora asfáltica.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://www.wirtgen-group.com/ocs/es-ar/voegele/super-1300-3-185-p/>].

7. Fresadora de pavimento

La fresadora de pavimento en frío es el equipo especializado en la remoción de capas de pavimento deteriorado, mediante un tambor giratorio de fresado equipado con puntas intercambiables de carburo de tungsteno que trituran y retiran el material a medida que el equipo avanza sobre la calzada. Es el primer equipo que interviene en los trabajos de rehabilitación y repavimentación: su tarea de preparación de la superficie (retirando el material envejecido hasta la profundidad especificada por el proyecto) es condición necesaria para la extensión de las nuevas capas asfálticas.

El proceso de fresado es uno de los más exigentes para el motor de la maquinaria vial en términos de carga sostenida: el tambor de fresado ejerce una resistencia de corte constante sobre el motor, que debe mantener la velocidad de rotación del tambor y el avance del equipo de manera simultánea y continua. La vibración generada por el proceso de corte, el polvo de material asfáltico en suspensión y el calor producido por la fricción de las puntas sobre el pavimento crean un entorno de operación

que los fabricantes clasifican universalmente como uso severo, con la consiguiente reducción del intervalo de cambio de aceite.

La capacidad del cárter de motor en fresadoras de mediana escala (con anchos de fresado de entre 500 mm y 1.200 mm, representativas del trabajo vial provincial) se ubica entre 9 y 13 litros, con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales y de 250 horas en condiciones severas (WIRTGEN GmbH, 2019). El material fresado (denominado RAP, Reclaimed Asphalt Pavement) contiene partículas finas de betún y áridos que se dispersan en el ambiente de trabajo, lo que clasifica a la fresadora como uno de los equipos de mayor exposición a polvo del parque vial.

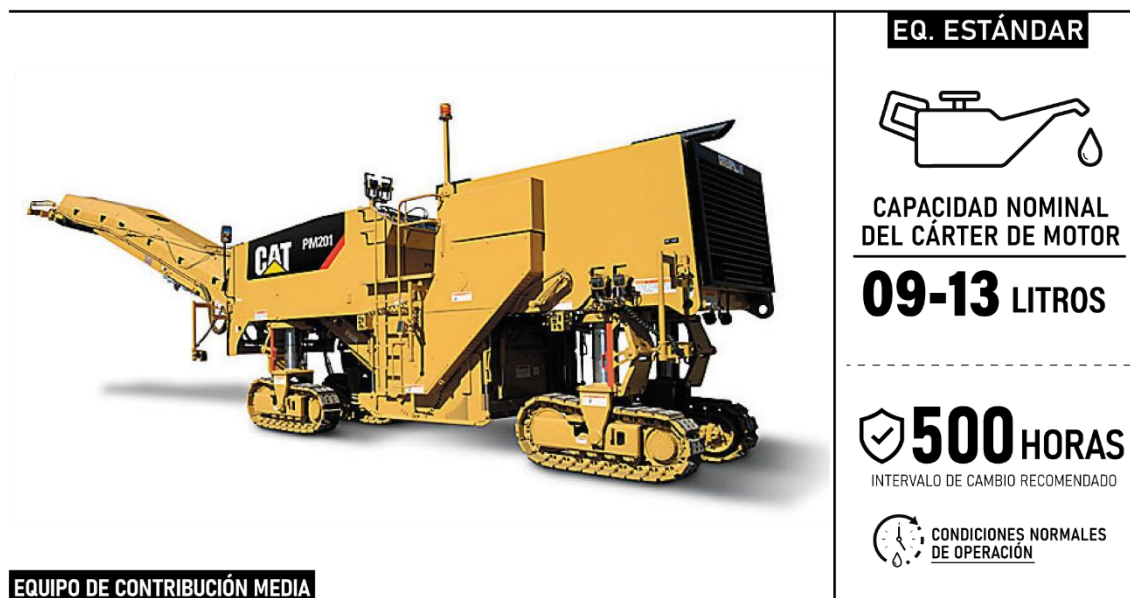


Gráfico 7 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Fresadora de pavimento.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://construproductos.com/producto/fresadora-de-pavimento-pm201-dFAm5>].

8. Retroexcavadora cargadora

La retroexcavadora cargadora (conocida habitualmente como retroexcavadora o simplemente retro) es uno de los equipos de mayor polivalencia en el obrador vial. Integra en un solo chasis dos herramientas de trabajo: una pala cargadora frontal, funcionalmente similar a la de la cargadora frontal de ruedas, pero de menor capacidad, y un brazo excavador posterior articulado en dos secciones (pluma y balancín) con un balde de excavación intercambiable que permite trabajar en distintas configuraciones según las necesidades de la tarea.

En las obras viales, la retroexcavadora cargadora se utiliza principalmente para la excavación de zanjas destinadas a la instalación de drenajes, alcantarillas, señalización y servicios complementarios; para la preparación de fundaciones de obras de arte menores; para el movimiento de materiales en espacios donde las dimensiones de una cargadora frontal de ruedas son excesivas; y para la carga de escombros y material de demolición en trabajos de rehabilitación. Su tamaño compacto (comparado con las cargadoras frontales de ruedas o las topadoras) la hace particularmente valiosa en trabajos dentro de zonas urbanas o en áreas de obra con espacio restringido.

El motor de la retroexcavadora cargadora trabaja en ciclos de carga muy variables: durante la excavación, cuando el brazo posterior está trabajando a plena extensión contra suelos cohesivos, el motor opera cerca de su par máximo; durante los desplazamientos y maniobras, la carga se reduce significativamente. Esa variabilidad de carga, combinada con la operación frecuente en terrenos con polvo y escombros, clasifica a la retroexcavadora en la categoría de uso severo en la mayoría de las condiciones de trabajo vial. La capacidad del cárter de motor se ubica típicamente entre 11 y 14 litros en retroexcavadoras de mediana potencia (entre 70 y 90 kW), con intervalos de cambio de 500 horas en condiciones normales y de 250 horas en condiciones severas (NEW HOLLAND Agriculture & Construction, 2016).

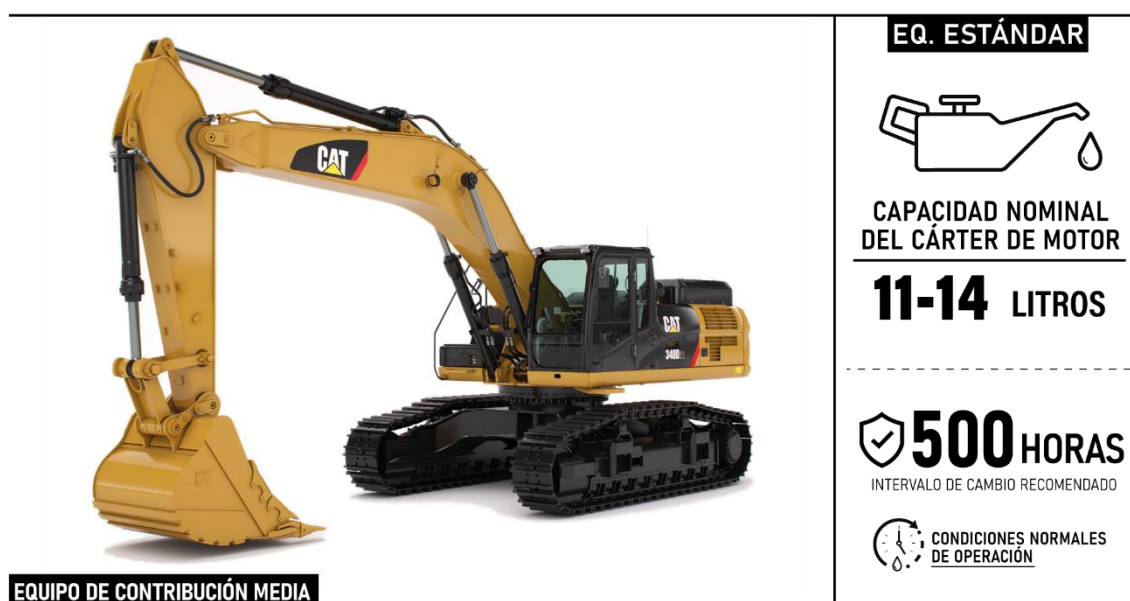


Gráfico 8 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Retroexcavadora.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://www.ferreyros.com.pe/equipo/340d2-l/>].

9. Mini cargadora de dirección deslizante

La mini cargadora de dirección deslizante (denominada en inglés skid-steer loader, y conocida comercialmente con nombres como Bobcat, que ha devenido en término genérico en el sector) es el equipo de menor tamaño del parque simulado y, al mismo tiempo, uno de los más versátiles. Su sistema de dirección no se basa en el giro de las ruedas sino en la diferencia de velocidad entre los dos lados del equipo: para girar a la derecha, las ruedas del lado derecho se frenan o invierten mientras las del izquierdo continúan avanzando, lo que produce un giro sobre el propio eje con un radio de curvatura prácticamente nulo. Esa capacidad de giro en espacio mínimo la hace imprescindible en trabajos dentro del obrador, en espacios confinados y en tareas auxiliares donde los equipos de mayor tamaño no pueden maniobrar.

En las obras viales, la mini cargadora se utiliza para el movimiento de materiales dentro del área de trabajo, la alimentación de mezcladoras o equipos de pequeña escala, la limpieza de superficies con accesorio de barredora o sopladora, el movimiento de materiales de señalización y elementos de

seguridad vial, y como plataforma para distintos accesorios intercambiables (martillo hidráulico, cuchilla angledozer, pala bivalva, horquilla elevadora) que amplían significativamente su campo de aplicación.

El motor de la mini cargadora es significativamente más pequeño que el de los demás equipos del parque: en modelos de entre 30 y 50 kW de potencia, la capacidad del cárter de motor se ubica entre 7 y 9 litros. Sin embargo, lo que distingue a este equipo en el contexto del modelo es su intervalo de cambio de aceite estándar de 250 horas, que es la mitad del intervalo estándar de los demás equipos del parque. Esta característica (especificada directamente por el fabricante en el manual técnico) tiene una consecuencia directa y relevante sobre la estimación: bajo las mismas horas de operación, la mini cargadora completa el doble de cambios que un equipo con intervalo de 500 horas, lo que eleva su contribución relativa a la GRE_{total} de manera desproporcionada respecto de su capacidad de cárter (BOBCAT Company, 2018).

Cuando sobre ese intervalo ya reducido se aplica el $Fco=0,5$ por condiciones de uso severo, el intervalo efectivo de la mini cargadora resulta de 125 horas: bajo uso intensivo (1.750 horas anuales), esto representa 14 cambios de aceite anuales, el mayor número de cambios individuales del parque.

Este caso ilustra de manera contundente por qué el relevamiento de los parámetros técnicos equipo por equipo (en lugar de asumir un intervalo uniforme para toda la flota) es una decisión metodológica crítica para la precisión y la utilidad del modelo.



Gráfico 9 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Mini cargadora.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.

Foto original: [<https://www.bobcat.com/eu/es/equipment/loaders/skid-steer-loaders>].

10. Perforadora de uso múltiple auxiliar

En la configuración de un parque simulado, el décimo equipo representa la categoría de maquinaria auxiliar de uso múltiple que completa la capacidad operativa del obrador vial para atender trabajos

específicos de menor escala: colocación de señalización vertical, instalación de postes y barreras de contención, trabajos de perforación para fundaciones menores y demolición puntual de estructuras.

Estos equipos (que pueden corresponder a perforadoras de poste, demoledoras compactas o versiones de mini cargadora con accesorios especializados, según los fabricantes de referencia del parque) comparten el perfil técnico de los equipos auxiliares de la categoría BOBCAT: motor de pequeña cilindrada (entre 30 y 50 kW), cárter de motor de entre 7 y 9 litros, e intervalo de cambio estándar de 250 horas. Al igual que la mini cargadora, la aplicación del $F_{co}=0,5$ sobre ese intervalo produce un intervalo efectivo de 125 horas, con las mismas implicancias sobre la frecuencia de cambios y la contribución a la GRE_{total} descritas en el punto anterior (BOBCAT Company, 2020).

La inclusión de este tipo de equipo en el parque simulado responde a un criterio de completitud representativa: en toda obra vial de mediana escala existen equipos auxiliares de este perfil técnico, cuya omisión sistemática en los modelos de estimación contribuiría a subestimar la generación real de ALU del sector. Al incluirlos con sus parámetros reales de manual, el modelo garantiza que incluso los equipos de menor tamaño del parque queden representados en la estimación.



Gráfico 10 - Ficha técnica de capacidad del cárter e intervalo de cambio recomendado en Mini cargadora con implemento.
Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator basándose en manuales técnicos del fabricante.
Foto original: [<https://spanish.alibaba.com/g/hydraulic-auger-crane-pile-driver.html>].

D. OBRADOR VIAL

El obrador vial es el espacio físico organizado desde el cual una empresa contratista gestiona la ejecución de una obra vial. Constituye la base operativa de toda la actividad constructiva; allí se concentran la maquinaria, el personal, los insumos, los equipos de apoyo y la infraestructura necesaria para sostener el trabajo de campo de manera continua durante el período de ejecución contractual.

Lejos de ser un simple estacionamiento de equipos, el obrador es una unidad operativa compleja que integra funciones de mantenimiento mecánico, almacenamiento de materiales e insumos, control de calidad, gestión administrativa y, de manera ineludible, generación y gestión de residuos peligrosos.

En obras viales de mediana y gran envergadura (como las que son objeto de análisis en este trabajo) el obrador suele instalarse en un predio próximo al área de trabajo, con una superficie variable según la escala de la obra, que puede oscilar entre media hectárea para obras menores y varias hectáreas para grandes contratos de construcción o mantenimiento de rutas nacionales o provinciales. Su vida útil coincide con el plazo de ejecución de la obra, aunque en contratos de mantenimiento de largo plazo puede permanecer operativo durante varios años consecutivos en el mismo emplazamiento.

La estructura funcional típica de un obrador vial de mediana escala comprende las siguientes áreas diferenciadas:

1. El área de estacionamiento y guarda de maquinaria es la zona de mayor superficie, donde los equipos se estacionan al finalizar la jornada de trabajo y desde donde salen al área de obra al inicio de cada turno. En obradores organizados, esta área tiene superficies impermeabilizadas o compactadas que evitan la contaminación del suelo por derrames de combustible, aceite o grasas durante las maniobras de los equipos.
2. El taller de mantenimiento es el corazón operativo del obrador desde el punto de vista técnico. Es el espacio donde se realizan los services programados de los equipos (incluyendo los cambios de aceite de motor que son el objeto central del modelo propuesto en este trabajo), los mantenimientos preventivos de los distintos sistemas de cada máquina, y las reparaciones correctivas menores. Un taller de obrador bien equipado cuenta con fosa o rampa de inspección, equipos de diagnóstico electrónico, prensa hidráulica, esmeril, compresor de aire y herramientas manuales especializadas. La organización y el registro documental de las intervenciones del taller (mediante órdenes de trabajo que consignan la fecha, el horómetro del equipo y las tareas realizadas) son la fuente primaria de datos que el modelo de control utiliza para la verificación cruzada de la variable H .
3. El área de almacenamiento de combustible aloja las cisternas o tanques de gasoil para el abastecimiento de la flota, generalmente con capacidades de entre 10.000 y 50.000 litros según el tamaño del parque y la frecuencia de reabastecimiento. Los registros de consumo de combustible de esta área (que documentan el volumen dispensado a cada equipo en cada carga) constituyen la segunda fuente de verificación cruzada del modelo, ya que permiten contrastar el consumo real de combustible con las horas de operación declaradas.
4. El área de oficinas y control concentra las funciones administrativas; gestión de personal, control de partes de obra, comunicación con el comitente y la dirección de obra, y archivo documental de la ejecución. Es en esta área donde se generan y archivan los partes de obra (que registran los equipos utilizados y las horas trabajadas en cada jornada) y donde se reciben y procesan los manifiestos de residuos peligrosos emitidos por los operadores habilitados que retiran el ALU y otros residuos del obrador.

5. El recinto de disposición transitoria de residuos peligrosos merece una caracterización específica y detallada, que se desarrolla a continuación, dado que es el espacio donde el ALU generado por el mantenimiento de los equipos se acumula entre el momento de su generación y el momento de su retiro por un operador habilitado, y porque su correcta implementación es un requisito normativo de primer orden cuyo incumplimiento es uno de los indicadores de gestión informal que el protocolo de control propuesto puede identificar.

E. PROCESO DE GENERACIÓN DE ALU EN EL OBRADOR

Para comprender cabalmente la relevancia del modelo propuesto, es necesario describir el proceso completo que va desde la generación del ALU en el taller del obrador hasta su salida formal del predio mediante el sistema de manifiestos.

Cuando un equipo del parque alcanza el umbral de horas establecido para el cambio de aceite (determinado por el intervalo del fabricante ajustado por el *Fco* a las condiciones reales del obrador), el mecánico procede a realizar el service. El equipo es posicionado sobre la fosa o en el área de mantenimiento designada, se abre el tapón de drenaje del cárter y el aceite usado fluye por gravedad hacia un recipiente de recolección (generalmente una bandeja o un tacho con capacidad suficiente para contener el volumen del cárter sin derrame). Simultáneamente se reemplaza el filtro de aceite, cuyo cartucho contiene entre 0,5 y 1,5 litros adicionales de aceite impregnado que también constituye ALU. Una vez completo el drenaje, se instala el nuevo filtro, se cierra el tapón de drenaje y se carga aceite nuevo hasta el nivel indicado en la varilla de control.

El aceite drenado (caliente, viscoso, de color pardo oscuro a negro) es el ALU que el modelo estima y que la normativa obliga a gestionar como residuo peligroso. En ese momento, el mecánico debería transferir ese aceite desde el recipiente de recolección hacia el contenedor de almacenamiento transitorio habilitado en el recinto de disposición de residuos del obrador, registrando el volumen transferido en el libro o planilla de seguimiento de residuos. Ese registro, sumado a la orden de trabajo del service que documenta el equipo, la fecha y el horómetro al momento del cambio, conforma la evidencia documental que el modelo de control utiliza como fuente de verificación y que el generador tiene obligación de mantener actualizada conforme al Decreto Provincial N°2.625/99.

Este proceso se repite para cada cambio de aceite de cada equipo del parque a lo largo del año, acumulando en el recinto de disposición transitoria el volumen total de ALU generado en el período. Cuando ese volumen justifica un retiro (o cuando el plazo máximo de almacenamiento transitorio definido por la normativa se aproxima a su vencimiento), el generador contrata a un operador de residuos peligrosos habilitado, que emite el Manifiesto de Residuos Peligrosos, retira el ALU del recinto y lo transporta hacia las instalaciones de tratamiento, reciclado o disposición final autorizadas.

Es en la comparación entre el volumen de ALU efectivamente retirado (documentado en los manifiestos) y el volumen que el modelo calcula que debería haberse generado donde reside la función de control del protocolo propuesto. Si esa comparación arroja una discrepancia superior al

umbral del 20%, el sistema de control activo que este trabajo propone tiene base técnica para iniciar una inspección profunda.

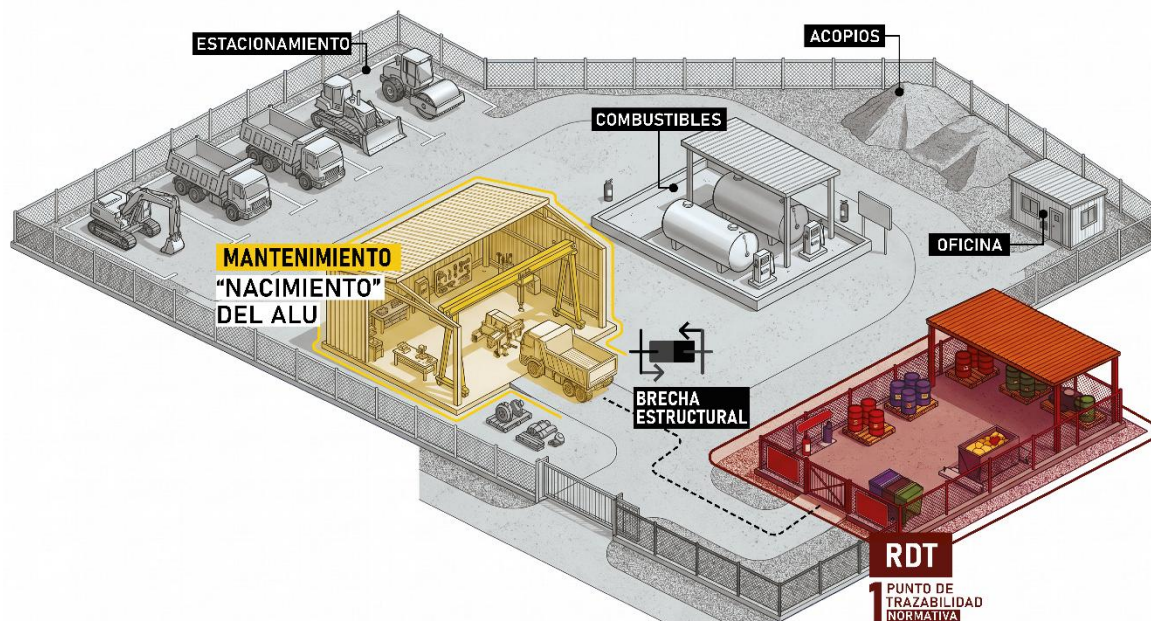


Gráfico 11 - Esquema operativo de obrador vial típico donde resalta área de taller de mantenimiento, RDT y flujo interno del ALU en el obrador vial.

La imagen ilustra cómo el residuo “nace” en el área de taller durante el service de las máquinas. La brecha estructural de control aparece en el movimiento interno del ALU desde el taller hacia el recinto de almacenamiento transitorio: si una cantidad no es ingresada físicamente al recinto, queda fuera del primer punto de control normativo visible para la DGFA, imposibilitando la verificación de la subdeclaración en la etapa administrativa actual.

Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator.

El Gráfico 11 permite visualizar con precisión dónde se origina el ALU dentro del circuito operativo del obrador y en qué punto del proceso se produce la brecha de trazabilidad que este trabajo se propone abordar. El residuo nace en el área de taller en el momento exacto en que el mecánico abre el tapón de drenaje del cárter del equipo en service: en ese instante, el aceite lubricante degradado deja de ser un insumo y se convierte en un residuo peligroso de la corriente Y8, sujeto a todas las obligaciones normativas que esa clasificación impone. A partir de ese momento, el flujo del ALU debería seguir un recorrido interno documentado y trazable: desde la cubeta de drenado en el área de taller, al recipiente de almacenamiento transitorio habilitado en el recinto de disposición, y desde allí, mediante el Manifiesto de Residuos Peligrosos, hasta las instalaciones del operador habilitado de retiro y tratamiento.

Sin embargo, es precisamente en ese tramo interno (entre el taller y el recinto de disposición transitoria) donde el sistema de control vigente presenta su vulnerabilidad estructural más crítica. El mecanismo de fiscalización actual de la DGFA opera sobre la documentación declarada: controla lo que el generador informa en su declaración jurada anual y verifica la existencia de manifiestos de retiro que respalden ese volumen declarado. Lo que ese mecanismo no puede controlar es el flujo físico real del ALU dentro del propio obrador, antes de que el residuo ingrese formalmente al recinto de disposición transitoria. Todo volumen de ALU que, por cualquier causa, no sea transferido íntegramente desde la cubeta de drenado del taller hacia el recinto habilitado (ya sea porque se dispone

de manera informal en el predio, porque se entrega sin manifiesto a terceros no habilitados, o porque simplemente no se registra) queda fuera del primer punto de control normativo visible para el ente regulador. Al no ingresar al recinto, no integra el volumen declarado en la declaración jurada y no genera ningún manifiesto de retiro, por lo que se vuelve administrativamente invisible para cualquier mecanismo de verificación documental basado en lo declarado.

Esta situación confirma la limitación estructural del sistema de control pasivo descripta en el planteamiento del problema; un modelo de fiscalización que solo controla lo que el generador ha decidido declarar no puede detectar aquello que el generador ha decidido no declarar. El único mecanismo capaz de romper esa circularidad es un modelo de estimación independiente que construya, a partir de la actividad real de la flota (las horas de operación de cada equipo, la capacidad de su cárter de motor y el intervalo de service especificado por el fabricante) un valor de referencia técnico propio, calculado con anterioridad e independencia de cualquier declaración del generador.

Es exactamente esa función la que cumple el modelo propuesto en este trabajo: trasladar el punto de control desde el recinto de disposición transitoria (donde el residuo ya puede haber sido manipulado o subdeclarado) hacia el taller mismo, donde el residuo se origina y donde sus parámetros de generación son objetivamente calculables a partir de datos verificables de manera independiente.

F. REQUISITOS NORMATIVOS DEL RDT

El recinto de disposición transitoria de residuos peligrosos es el área designada dentro del obrador para el almacenamiento temporal del ALU y de otros residuos peligrosos generados por las operaciones de mantenimiento, entre el momento de su generación y el momento de su retiro por un operador habilitado. Su correcta implementación no es una opción de buenas prácticas sino una obligación normativa establecida por el Decreto Provincial N°2.625/99 en el marco de la Ley Provincial N°5.917/92 y sus resoluciones complementarias, cuyo incumplimiento habilita la aplicación del régimen sancionatorio de la Ley N°5.961.

El análisis de los requisitos normativos aplicables al recinto de disposición transitoria debe abordarse desde tres dimensiones complementarias: las condiciones físicas y constructivas del recinto, los requisitos de identificación y señalización, y las obligaciones de registro y documentación asociadas.

El Decreto N°2.625/99 y la normativa técnica de referencia nacional (que en Mendoza opera por adhesión a través de la Ley N°5.917/92) establecen que el área de almacenamiento transitorio de residuos peligrosos debe cumplir condiciones físicas mínimas que garanticen la contención de derrames accidentales y la prevención de la contaminación del suelo, las aguas subterráneas y el entorno del obrador.

La condición más crítica desde el punto de vista ambiental es la impermeabilización del piso del recinto. El ALU, por su viscosidad y su capacidad de penetración en suelos porosos, puede contaminar el subsuelo de manera persistente ante el más mínimo derrame si el piso del área de almacenamiento no es impermeable. La normativa exige que el piso del recinto sea de hormigón, asfalto u otro material

impermeable certificado, sin fisuras ni juntas sin sellado que pudieran permitir la infiltración de líquidos derramados.

El recinto debe contar con un sistema de contención de derrames que impida que cualquier vertido accidental de ALU u otro residuo líquido peligroso escape hacia el exterior del área delimitada. Este sistema puede implementarse mediante bordillos perimetrales de hormigón de altura suficiente para contener el volumen del recipiente de mayor capacidad del recinto más un margen de seguridad, o mediante una cubeta de contención de material impermeable que rodee los contenedores de almacenamiento. La capacidad mínima del sistema de contención debe ser, como mínimo, el 110% del volumen del recipiente de mayor capacidad almacenado en el recinto, o el 25% del volumen total almacenado, adoptando el mayor de los dos valores.

El recinto debe estar cubierto para proteger los residuos almacenados de la exposición directa a la lluvia y al sol. La exposición solar prolongada puede degradar los recipientes plásticos y generar vapores en el interior de los contenedores que aumenten la presión interna; la lluvia puede mezclar el agua de escorrentía con el ALU derramado y facilitar su migración hacia el sistema de drenaje del obrador. La cubierta puede ser de chapa, polietileno de alta densidad u otro material resistente a la intemperie, y debe impedir la entrada de agua de lluvia al área de almacenamiento.

El acceso al recinto debe ser restringido y controlado. Solo el personal de mantenimiento autorizado y los operadores de residuos peligrosos habilitados para el retiro del ALU deben tener acceso al interior del recinto. Esta restricción tiene dos fundamentos: el primero es la seguridad operativa, dado que el ALU es inflamable y su manipulación inadecuada puede generar riesgos de incendio; el segundo es la integridad del sistema de control, dado que el acceso irrestricto al recinto podría facilitar la disposición irregular de parte del ALU almacenado antes del retiro formal por el operador habilitado.

El recinto debe estar ventilado de manera natural o forzada para evitar la acumulación de vapores de hidrocarburos en su interior, que podrían generar atmósferas explosivas o tóxicas para el personal que acceda a realizar operaciones de carga y descarga de recipientes. La ventilación debe garantizar al menos seis renovaciones de aire por hora conforme a los estándares de seguridad aplicables a locales con almacenamiento de líquidos inflamables.

La normativa vigente (Decreto N°2.625/99 y Resolución N°667/08) establece requisitos específicos de identificación y señalización tanto del recinto en su conjunto como de cada uno de los recipientes de almacenamiento que contiene.

El recinto debe estar señalizado con carteles visibles desde el exterior que indiquen su condición de área de almacenamiento de residuos peligrosos, los tipos de residuos almacenados, los riesgos asociados (inflamable, tóxico, nocivo para el medio ambiente), las restricciones de acceso y los datos de contacto de emergencia. Los carteles deben ser resistentes a la intemperie y deben mantenerse legibles durante toda la operación del obrador.

Los recipientes de almacenamiento (típicamente tanques de polietileno de alta densidad (PEAD), barriles metálicos de 200 litros o contenedores tipo IBC (Intermediate Bulk Container) de entre 500 y 1.000 litros) deben estar etiquetados de manera clara y permanente con la siguiente información mínima:

- denominación del residuo contenido (aceite lubricante usado, corriente Y8);
- fecha de inicio del almacenamiento en ese recipiente;
- nombre y CUIT del generador;
- número de inscripción en el Registro Provincial de Generadores;
- volumen aproximado contenido;
- y pictogramas de peligrosidad conforme a las normas de transporte de mercancías peligrosas aplicables (IATA/IMDG/ADR según corresponda).

Los recipientes deben estar identificados de manera individual y su contenido no puede mezclarse con otros tipos de residuos peligrosos sin la autorización expresa del operador de tratamiento habilitado. En particular, el ALU no puede mezclarse con solventes, pinturas, baterías usadas u otros residuos peligrosos del obrador, ya que esa mezcla puede alterar las características del residuo y dificultar o imposibilitar su tratamiento o valorización posterior.

Los pictogramas de peligrosidad deben corresponder a las clasificaciones aplicables al ALU según el Decreto N°831/93: clase 3 (líquido inflamable), dado que el ALU tiene un punto de inflamación típicamente superior a los 60°C, pero inferior a los 93°C; y el símbolo de peligro ambiental (árbol y pez muerto), que indica la alta capacidad contaminante del residuo para el medio acuático y terrestre.

El Decreto N°2.625/99 establece la obligación del generador de mantener un registro interno de generación y almacenamiento de residuos peligrosos actualizado, que documente de manera continua el volumen de cada tipo de residuo generado, la fecha de generación, el recipiente de destino dentro del recinto de disposición transitoria y el volumen acumulado en cada momento. Este registro es el instrumento que vincula la operación del taller (donde se genera el ALU) con el recinto de disposición transitoria y, posteriormente, con el manifiesto de retiro.

En términos prácticos, ese registro debería documentar cada cambio de aceite realizado en el taller:

- fecha de la intervención,
- número de identificación del equipo,
- horómetro al momento del cambio,
- volumen de ALU generado (en litros),

- recipiente de destino en el recinto
- y nombre del operario responsable.

La suma de esos registros a lo largo del período anual produce el volumen total de ALU generado, que es el dato que el generador debe declarar en su declaración jurada anual ante la DGFA.

La comparación entre ese registro interno (que el generador tiene obligación de mantener y que el inspector puede solicitar en el acto de inspección) y el valor de la *GRE* calculada por el modelo para el mismo período y parque de equipos constituye la verificación más directa y potente que el protocolo propuesto puede realizar. Si el registro interno es consistente con la *GRE* calculada, la declaración es coherente. Si el registro interno muestra volúmenes significativamente inferiores a la *GRE* (o si directamente no existe un registro sistemático) eso constituye un indicio de primer orden de subdeclaración, independientemente de lo que la declaración jurada formal indique.

El plazo máximo de almacenamiento transitorio en el recinto del generador es otro requisito normativo de primer orden. La normativa nacional y provincial no establece un plazo único universal, sino que vincula el tiempo máximo de almacenamiento a la condición de no superar ciertos volúmenes y a la obligación de retirar el residuo de manera periódica mediante el sistema de manifiestos. En la práctica regulatoria de la DGFA, se considera que el almacenamiento transitorio no debe extenderse más allá de doce meses sin que se haya producido al menos un retiro formal documentado mediante manifiesto. El incumplimiento de esta condición (que puede evidenciarse en la inspección por la acumulación de ALU sin manifiestos de retiro en el período correspondiente) es otra señal de alerta que el protocolo de control activo puede identificar y documentar.

El ciclo de gestión formal del ALU en el obrador vial se completa cuando el generador contrata a un operador de residuos peligrosos habilitado (inscripto en el Registro Provincial de Operadores de la DGFA) para el retiro del ALU acumulado en el recinto de disposición transitoria. En ese acto se emite el Manifiesto de Residuos Peligrosos, que es el instrumento jurídico y de trazabilidad que documenta el movimiento del residuo desde el generador hasta el destino final autorizado.

En la provincia de Mendoza, el manifiesto se gestiona actualmente a través del sistema SIMEL (Sistema de Manifiestos Electrónicos), plataforma digital que permite la carga, seguimiento y validación del manifiesto por parte de todos los actores de la cadena: el generador carga los datos del residuo y el destinatario; el transportista habilitado confirma el retiro con su firma digital; el operador de tratamiento o disposición final confirma la recepción y el procesamiento del residuo. Cada manifiesto queda registrado en el sistema con número único, fecha, volumen, tipo de residuo y datos de todos los actores intervinientes, generando un registro electrónico de la cadena de custodia completa.

El número de manifiestos emitidos por un generador en un período y los volúmenes de ALU consignados en ellos son la fuente de contraste empírico más directa disponible para el modelo de control propuesto; si la suma de los volúmenes de ALU consignados en todos los manifiestos emitidos por un generador durante el período analizado es significativamente inferior a la *GRE* calculada por

el modelo para ese mismo período y parque de equipos, la diferencia es el indicio cuantificado de subdeclaración que justifica el inicio del protocolo de inspección profunda.

		MANIFIESTO DE TRANSPORTE				
Fecha de Retiro 09 01 26		N° 00004957				
		Remito 				
Datos Identificatorios						
Generador		Transportista		Operador		
Nombre		AMBIENTAL MENDOZA S.A.		AMBIENTAL MENDOZA S.A.		
Domicilio Planta		Larrea 926 - Chacras de Coria - Luján de Cuyo - Mendoza.		San Francisco Monte 3729-Maipú-Mendoza		
Expediente		EX-2018-04201266-GDMZA-DPAM5AYOT		EX-2024-02250239-GDEMZA-DPAM5AYOT		
CUIT		30-71144900-7		30-71144900-7		
C.A.A.		Nro T-00051 Vto 05-06-2026		Nro O-00080 Vto 31-03-2026		
Vehículo			Tipo de Caja			
Nro Patente / Matricula			Tipo de Vehículo			
			CA			
			CA/ ACOPLADO			
			CA			
Información de Residuos						
Contenedores	CSC	Descripción	⚠	Cant. (estimada)	Cant. (real)	Estado
GR 1	Y8	DESECHOS DE HIDROCARBUROS O ACEITES MINERALES NO APTOS PARA EL USO AL QUE ESTABAN DESTINADOS	H3	4000	3200	Líquido
GR 1	Y48Y8C	SOLIDOS, TRAPOS, MATERIAL ABSORBENTE, EPP, Y RESIDUOS SIMILARES CONTAMINADOS CON Y8	H12	4500	2738	Sólido
GR 1	Y48Y12C	SOLIDOS, TRAPOS, MATERIAL ABSORBENTE, EPP, Y RESIDUOS SIMILARES CONTAMINADOS CON Y12	H12	800	211	Sólido
Información de emergencia						
Teléfono		Operador		Transportista		
		0261 153898439		0261 153898439		
Certificación						
Firma		Generador		Operador fijo/transitorio		Transportista
Adscripción						AMBIENTAL MENDOZA S.A. JEREMÍAS M. BELLENE PRESIDENTE
Fecha		09/01/2026				09-01-2026
Declaración Jurada: Certificación del Generador Declaro bajo juramento, que la información y los datos manifestados en el presente, son veraces y se ajustan a la legislación vigente en la materia						
Original Generador - Duplicado Transportista - Triplicado Operador						

Figura 1 - Manifiesto de transporte de residuos peligrosos (Ley 24.051).

Fuente: Documentación interna provista por Ambiental Mendoza (2026).

Nota: Los datos correspondientes a la empresa generadora han sido anonimizados para resguardar la confidencialidad comercial.

El incumplimiento de los requisitos del recinto de disposición transitoria o de las obligaciones de registro, declaración y retiro mediante manifiesto no es solo una irregularidad ambiental: tiene consecuencias jurídicas concretas bajo el régimen sancionatorio de la Ley N°5.961 y de la Ley N°24.051. Las sanciones previstas incluyen apercibimiento formal, multas administrativas graduadas según la gravedad de la infracción y la reincidencia, suspensión o cancelación del Certificado de Habilitación Ambiental que habilita a la empresa a operar como generador inscripto, y en casos de contaminación comprobada del suelo, agua u otros recursos naturales, responsabilidad civil objetiva y solidaria por los daños causados conforme al artículo 22 de la Ley N°24.051.

Desde el punto de vista de la política ambiental provincial, la detección de recintos de disposición transitoria que no cumplen los requisitos normativos (sin impermeabilización, sin señalización, sin registro documental, con recipientes sin identificación o con volúmenes almacenados inconsistentes con la actividad declarada) es una señal de alerta concreta que el inspector de la DGFA puede identificar durante una visita de campo y que, combinada con la discrepancia cuantitativa entre la *GRE* calculada y el volumen declarado, conforma un cuadro probatorio sólido para sustentar un procedimiento administrativo sancionatorio.

METODOLOGÍA

FORMULACIÓN: DEL CONTROL PASIVO AL CONTROL ACTIVO

Las empresas viales que operan en Mendoza con flota propia de maquinaria pesada son generadoras de aceites lubricantes usados, clasificados como residuos peligrosos bajo la categoría Y8 de la Ley Nacional N°24.051 y su adhesión provincial mediante la Ley N°5.917/92. La normativa vigente (articulada principalmente a través del Decreto Provincial N°2.625/99 y la Resolución N°667/08 de la Secretaría de Medio Ambiente) exige que estas empresas se inscriban en el Registro Provincial de Generadores de Residuos Peligrosos y presenten una declaración jurada anual informando los volúmenes de cada tipo de residuo generado durante el período.

Sin embargo, ese sistema presenta una brecha estructural: la declaración es el único mecanismo de información disponible y no existe ningún procedimiento técnico estandarizado que permita al ente regulador verificar si los volúmenes informados son coherentes con la actividad real de la empresa. El inspector que recibe la declaración no dispone de parámetros de referencia para determinar si los litros de ALU declarados son verosímiles en función del tamaño del parque, los tipos de máquinas y las horas de operación registradas. En consecuencia, el sistema de control depende, en última instancia, de la buena fe del generador.

Esta situación genera las condiciones para que la subdeclaración de ALU sea una práctica extendida y difícilmente detectable: una empresa puede informar una fracción de los aceites realmente generados, reduciendo así sus costos de disposición final (a cargo de operadores habilitados) sin que el ente regulador cuente con herramientas para identificar la irregularidad. El residuo subdeclarado queda fuera de la cadena formal de trazabilidad, con el riesgo ambiental y sanitario que ello implica dado el carácter tóxico, inflamable y altamente contaminante del ALU (ATSDR, 1997; Vázquez-Duhalt, 1989).

El modelo técnico propuesto en este trabajo invierte esa lógica. En el sistema vigente, el regulador espera pasivamente a recibir la declaración y solo actúa si detecta una inconsistencia documental evidente o si se produce una denuncia externa: es un control reactivo, post-hecho, que opera sobre información que el propio fiscalizado ha producido y que no puede ser contrastada con ningún parámetro independiente.

La aplicación del modelo de balance de masas propuesto transforma ese paradigma. Antes de recibir la declaración, o en el momento mismo de recibirla, el ente regulador puede calcular de manera independiente cuánto ALU debería haber generado esa empresa en función de su parque de maquinaria y sus horas de operación. Ese cálculo convierte al organismo de control en un actor activo: en lugar de esperar a ver qué declara la empresa, el regulador llega a la instancia de control con un valor de referencia técnico propio y fundamentado. Si la declaración no coincide con ese valor dentro del margen de tolerancia establecido, el regulador tiene base técnica suficiente para solicitar explicaciones, requerir documentación adicional o iniciar una inspección de campo (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019).

Este corrimiento del control pasivo hacia el control activo es el aporte central que este trabajo pretende hacer al sistema de gestión ambiental provincial. No requiere modificar la normativa vigente: opera dentro del marco que las leyes ya existentes le habilitan a la DGFA para ejercer su poder de policía

ambiental. Lo que aporta es la herramienta técnica que hasta ahora faltaba: un protocolo que traduce los datos de maquinaria, horas de operación y frecuencia de service en un indicador de generación esperada objetivamente calculable, verificable de manera independiente y técnicamente inobjetable.

La hipótesis que orienta el presente trabajo es la siguiente:

La aplicación de un modelo técnico de control basado en indicadores de generación esperada y balance de masas permite detectar subdeclaraciones de aceites lubricantes usados en empresas viales, mejorando la trazabilidad y fortaleciendo el control ambiental del sector.

Esta hipótesis es verificable mediante simulación técnica controlada: si el modelo, aplicado sobre un parque de maquinaria con parámetros técnicos reales y escenarios operativos representativos, produce valores de GRE que permiten distinguir con precisión entre declaraciones coherentes y declaraciones subdeclaradas para distintos niveles de subdeclaración hipotética, la hipótesis queda demostrada en su dimensión técnica. La verificación empírica sobre datos reales de empresas específicas queda planteada como extensión natural del trabajo en una etapa posterior de implementación institucional.

A. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y validar un modelo técnico de control basado en balance de masas que permita estimar la generación real esperada de aceites lubricantes usados en empresas del sector vial de la provincia de Mendoza, como herramienta para que el ente regulador provincial detecte subdeclaraciones de residuos peligrosos y fortalezca la trazabilidad ambiental del sector.

B. TIPO, DISEÑO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio es de tipo descriptivo, dado que tiene como propósito caracterizar y detallar las variables asociadas al consumo y generación de aceites lubricantes usados en maquinaria vial, sin manipularlas ni modificar las condiciones en que ocurren (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014). Se centra en observar, registrar y comparar cómo se manifiesta el fenómeno de la subdeclaración de residuos peligrosos en el sector vial de la provincia de Mendoza, describiendo los patrones de consumo esperado, la frecuencia de cambio y la generación estimada de aceites usados, así como las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los volúmenes de referencia disponibles.

El diseño es no experimental y combina dos componentes complementarias. La primera es una componente documental, basada en el relevamiento sistemático de manuales técnicos originales de fabricantes de maquinaria pesada, de los cuales se extraen los parámetros técnicos que alimentan el

modelo. La segunda es una componente de simulación técnica controlada, en la que la variable operativa de horas de trabajo se construye a partir de rangos representativos del sector vial mendocino, organizados en tres escenarios de intensidad de uso (intensivo, moderado y mínimo), sobre los que se aplica el modelo de balance de masas para calcular la Generación Real Esperada total del parque simulado. No se interviene sobre las variables analizadas ni se accede a registros internos confidenciales de ninguna empresa en particular.

El diseño no experimental es coherente con el objetivo del trabajo: no se busca establecer relaciones causales entre variables ni comprobar el efecto de una intervención, sino describir el comportamiento del modelo bajo condiciones controladas y demostrar su capacidad para producir valores de referencia técnicamente sólidos y auditables (Hernández Sampieri et al., 2014).

El alcance del presente estudio se define por su naturaleza técnica y operativa, poseyendo una validez de aplicación continua. El modelo no se restringe a un marco cronológico fijo, sino que está diseñado para ser implementado en cualquier ciclo de fiscalización que la autoridad de aplicación determine. Los escenarios de simulación propuestos no responden a un período de tiempo específico, sino que representan estados de actividad (mínimo, moderado e intensivo) que caracterizan la dinámica estructural del sector vial, garantizando la vigencia del protocolo ante cualquier coyuntura operativa futura.

C. UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis del presente trabajo se define como el binomio equipo-operación, centrado en maquinaria pesada de movimiento de suelos y pavimentación. Se selecciona esta unidad debido a que en ella convergen las variables críticas del modelo: capacidad de cárter (*C*), intervalo de mantenimiento (*I*) y registro horométrico (*H*).

Para la validación del modelo se construye un caso de aplicación simulado que representa una flota básica de una empresa contratista del sector, compuesta por diez (10) equipos. Esta composición responde a un criterio deliberado de representatividad mínima suficiente: se seleccionan los tipos de maquinaria que conforman el núcleo productivo esencial de cualquier obra vial de mediana escala en Mendoza, con independencia del tamaño o la especialización particular de cada empresa. El parque incluye equipos de distintos fabricantes lo que demuestra que el modelo no depende de una marca específica ni de un tipo de motor particular, sino que es aplicable con la misma lógica a cualquier equipo del que se disponga el manual técnico del fabricante.

La elección de diez equipos de distintos fabricantes y tipologías responde además a un argumento de simplicidad operativa: si el modelo funciona correctamente sobre un parque de esa diversidad y escala, su extensión a parques más grandes no introduce complejidad metodológica adicional, solo más filas en la Matriz de Control. Un inspector puede replicar el procedimiento sobre cualquier flota del sector con el mismo protocolo y sin necesidad de adaptaciones.

1. Enfoque en equipos críticos

Una decisión metodológica central del trabajo es el enfoque exclusivo en maquinaria pesada autopropulsada, con prescindencia de los vehículos de logística liviana (camionetas, vehículos de transporte de personal, utilitarios) que también forman parte del parque de una empresa vial.

Esta decisión responde a razones técnicas concretas. En primer lugar, el impacto volumétrico: la maquinaria pesada de movimiento de suelos y pavimentación tiene cárteres de motor con capacidades que oscilan entre 8 y 35 litros, frente a los 4 a 6 litros típicos de un vehículo liviano. Combinado con intervalos de cambio que en condiciones severas se ubican entre 125 y 250 horas de operación intensiva, la maquinaria pesada genera entre cuatro y seis veces más ALU por unidad de tiempo que un vehículo liviano equivalente. Excluir la logística liviana del modelo no solo no lo debilita sino que refuerza su carácter de estimación mínima: la GRE calculada sobre la maquinaria pesada sola ya es suficiente para detectar subdeclaraciones significativas.

En segundo lugar, la norma horométrico: en la maquinaria pesada, el control de las horas de operación mediante horómetro es una práctica estándar del sector, exigida por los propios fabricantes como base del programa de mantenimiento preventivo y requerida habitualmente por los comitentes de obra. Eso significa que los datos de H son sistemáticamente disponibles, verificables y comparables con fuentes independientes como los partes de obra. En los vehículos livianos, en cambio, el control se realiza habitualmente por kilometraje y no por horas de motor, lo que introduciría un modelo de conversión adicional con incertidumbre innecesaria.

En tercer lugar, la verificabilidad en campo: un inspector que aplica el protocolo en un obrador vial puede identificar, documentar e individualizar la maquinaria pesada de manera inmediata y unívoca. Cada equipo tiene número de serie o número interno y corresponde a una entrada del manual técnico del fabricante. La logística liviana, con mayor rotación y menor diferenciación técnica entre unidades, es más difícil de individualizar y vincular a parámetros específicos en el contexto de una inspección de campo.

D. FUENTES DE DATOS

La recolección de datos se apoya en dos fuentes estructurales que alimentan directamente el modelo de estimación y en una fuente de referencia opcional para validación de coherencia sectorial. Esta arquitectura es coherente con el diseño no experimental y de simulación técnica controlada adoptado: el modelo no requiere acceder a registros internos de ninguna empresa particular ni depende de la cooperación de terceros para producir resultados técnicamente válidos y verificables.

1. Primera fuente estructural: *manuales técnicos de fabricantes*

Los manuales técnicos originales de los fabricantes de cada tipo de equipo del parque constituyen la fuente primaria central del trabajo. Son documentos de dominio público, verificables de manera independiente por cualquier inspector, que no requieren ningún tipo de autorización ni colaboración de las empresas fiscalizadas para ser consultados. Su contenido es objetivo y estable:

los parámetros que especifican no varían según quién los consulte ni según el contexto de la inspección.

De cada manual se extraen los dos parámetros técnicos fijos del modelo:

- a. La capacidad nominal del cárter de motor (*variable C, en litros*), incluyendo el volumen del filtro cuando la especificación del fabricante lo integra al total de carga. Cuando el manual indica un rango de capacidad según la configuración del equipo, se adopta el valor inferior del rango en aplicación del criterio de estimación mínima.
- b. El intervalo de cambio de aceite de motor (*variable I, en horas de operación*), diferenciando entre el intervalo para condiciones normales y el intervalo para condiciones de uso severo cuando el manual lo especifica. Los valores de *I* que se incorporan a la base de datos del modelo corresponden al intervalo para condiciones normales de operación. La aplicación del *Factor de Condición Operativa (Fco)* se realiza sobre esos valores al momento del cálculo, de modo que el ajuste sea visible, trazable y auditable, sin incorporarse de manera implícita en la tabla base (Matriz de Control).

El relevamiento se efectúa mediante el siguiente procedimiento estandarizado, aplicado equipo por equipo: identificación de la sección del manual correspondiente a lubricación, intervalos de mantenimiento o especificaciones de fluidos; registro de la capacidad nominal del cárter incluyendo el filtro cuando corresponde; registro del intervalo de cambio para condiciones normales y, cuando el manual lo especifica, para condiciones severas; y documentación de la clasificación API y grado SAE del aceite recomendado. Cuando el manual especifica un rango, se adopta el valor inferior para *C* y el valor más largo para *I*, ambos en aplicación del criterio de conservadurismo. Todos los parámetros se documentan en una ficha técnica por equipo que es reproducible por cualquier inspector que acceda al mismo manual, garantizando la verificabilidad independiente de la base de datos del modelo.

2. Segunda fuente estructural: *escenarios de simulación*

La variable *H* (horas operativas por equipo) se construye mediante parámetros operativos simulados, definidos a partir de rangos técnicos que representan la variabilidad estructural de la actividad vial. Esta fuente no es arbitraria: los valores de *H* asignados a cada equipo en los distintos escenarios se fundamentan en los rangos de utilización anual típicos por tipo de maquinaria publicados por organismos de referencia global, tales como la Association of Equipment Manufacturers (AEM) y el Committee for European Construction Equipment (CECE). La utilización de una variable *H* simulada aporta dos ventajas metodológicas críticas para la solidez del protocolo:

- a. Generalización del modelo: Al no depender de los registros históricos de una empresa específica, el protocolo se valida como una herramienta estándar aplicable a cualquier contratista del sector, independientemente del contexto cronológico en que se realice la fiscalización.

- b. Capacidad discriminatoria controlada: Permite evaluar la sensibilidad del modelo bajo condiciones de estrés operativo (uso intensivo, moderado y mínimo). Al introducir niveles de subdeclaración hipotética en estos escenarios, se puede determinar con precisión el umbral en el que el modelo activa las alertas de inconsistencia y el margen de seguridad técnica que ofrece el protocolo ante diferentes regímenes de trabajo.

Este enfoque garantiza que el modelo sea autocontenido: su validez no depende de la obtención de datos externos de terceros, sino de la interacción lógica entre las especificaciones del fabricante (Fuente I) y los regímenes de uso estandarizados por la industria (Fuente II).

3. Fuente de referencia opcional: *datos sectoriales agregados*

Con carácter complementario y no estructural, el trabajo contempla la consulta de datos sectoriales agregados sobre la gestión de ALU en la provincia de Mendoza, siempre que los mismos resulten accesibles a través del sistema SIMEL o de registros públicos de la DGFA (Ley N°25.675 y Ley Provincial N°5.961). Esta fuente no alimenta el modelo ni condiciona sus resultados; su función es exclusivamente la de validación de coherencia de orden de magnitud. Las vías de consulta, de resultar accesibles, son el sistema SIMEL (plataforma oficial de manifiestos electrónicos que registra los movimientos de residuos peligrosos incluyendo la categoría Y8) y los datos agregados de la DGFA, solicitables en el marco del derecho de acceso a información ambiental del artículo 16 de la Ley N°25.675 y de la Ley Provincial N°5.961, sin identificación de empresas individuales.

NOTA: El modelo es autocontenido. Si los datos sectoriales resultan inaccesibles, parciales o de alcance temporal distinto al período analizado, ello no afecta en ningún grado la validez ni las conclusiones del trabajo. El protocolo produce resultados técnicamente válidos a partir exclusivamente de sus dos fuentes estructurales, sin requerir la cooperación ni la respuesta de ningún organismo o empresa externa. La coherencia con datos sectoriales disponibles, cuando pueda verificarse, opera como elemento de triangulación metodológica adicional, no como condición necesaria de validez.

E. PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS TÉCNICOS

La extracción de los parámetros *C* e *I* de los manuales técnicos de fabricantes sigue un procedimiento estandarizado que garantiza la reproducibilidad del relevamiento y la trazabilidad de los datos incorporados al modelo.

Para cada tipo de equipo del parque simulado se identifican los siguientes datos del manual técnico original: denominación y modelo del equipo; marca y/o país de fabricación; sección del manual de la que se extraen los datos (usualmente denominada "lubricación", "intervalos de mantenimiento" o "especificaciones de fluidos"); capacidad nominal del cárter de motor en litros, incluyendo el filtro cuando corresponda según la especificación del fabricante; intervalo de cambio de aceite de motor en horas para condiciones normales de operación; intervalo de cambio para condiciones de uso severo, cuando el manual lo especifique; y clasificación API y grado SAE del aceite de motor recomendado.

Cuando el manual especifica un rango de capacidad (por ejemplo, "entre 14 y 16 litros según configuración") se adopta el valor inferior del rango, en aplicación del criterio de estimación mínima. Cuando el manual especifica un rango de intervalos de cambio (por ejemplo, "cada 250 a 500 horas según condiciones"), se adopta el valor más largo del rango para condiciones normales y el valor más corto para condiciones severas.

Todos los parámetros extraídos se documentan en una ficha técnica que forma parte del registro de la investigación y que es reproducible por cualquier inspector que acceda al mismo manual técnico. Esta característica de verificabilidad independiente es la que le otorga al modelo su solidez como herramienta de fiscalización: los datos de base no dependen de estimaciones del investigador sino de especificaciones del fabricante que son de dominio público. Se consolidan estos parámetros en la Matriz de Control que alimenta el modelo.

F. MATRIZ DE CONTROL

El instrumento operativo central del modelo es la Matriz de Control de Generación Esperada de ALU, tabla estructurada que el inspector completa durante la inspección o con carácter previo a ella, a partir de los datos del parque de maquinaria de la empresa fiscalizada. Su diseño responde al principio de máxima simplicidad operativa: puede completarse con una calculadora de mano o una hoja de cálculo básica, sin requerir software especializado, lo que garantiza su aplicabilidad en campo por un inspector con formación técnica básica en gestión ambiental.

La matriz se organiza con una fila por equipo del parque analizado y las siguientes ocho columnas:

Columna 1, identificación del equipo (*número interno o patente, marca, modelo y tipo de maquinaria*);

Columna 2, capacidad del cárter C en litros según manual del fabricante con indicación de fuente;

Columna 3, intervalo del fabricante $I_{fabricante}$ en horas para condiciones normales;

Columna 4, Factor de Condición Operativa F_{co} adoptado con su justificación observacional;

Columna 5, intervalo efectivo $I_{efectivo}$ en horas, resultado de $I_{fabricante} \cdot F_{co}$;

Columna 6, horas operativas del período H según registros verificados con indicación de fuente;

Columna 7, número de cambios completados $[H / I_{efectivo}]$; y

Columna 8, GRE individual en litros, resultado de $N^{\circ} \text{ cambios} \cdot C \cdot F_p$ con $F_p=0,90$.

La fila de totales suma las GRE individuales para obtener la GRE_{total} del parque, que se compara directamente con el $V_{declarado}$ para determinar si la discrepancia supera el umbral del 20%.

Tabla 1. Parámetros técnicos relevados de manuales de fabricantes

Nº	Equipo/Modelo	Motor	C (L)	I <i>fab.hs</i>
1	Terminadora de Asfalto (VOGELE Super 1800-3)	Cummins QSB6.7	13,0	500
2	Terminadora de Asfalto (VOGELE Super 1800-2)	Perkins 1106D-E66TA	13,2	500
3	Terminadora de Asfalto (VOGELE Super 1300-3)	Deutz TCD 3.6 L4	8,0	500
4	Cargadora Frontal (XCMG ZL50G / LW500K)	Weichai WD10G220E21	20,0	500
5	Cargadora Frontal (LIUGONG CLG856)	Cummins 6CT8.3	28,5	500
6	Mini Cargadora (BOBCAT S450)	Bobcat 2.4L97/4	8,2	250
7	Compactador Neumático (HAMM GRW 280)	Deutz TCD 2012 L04 2V	12,5	500
8	Fresadora de Pavimento (WIRTGEN W 100)	Deutz TCD 2012 L04 2V	10,0	500
9	Mini Cargadora (BOBCAT S130)	Kubota V2203-M-DI	8,1	250
10	Motoniveladora (CAT 120K)	Cat C7 ACERT	15,0	500
11	Motoniveladora (SANY STG190C-8)	Cummins 6BTAA5.9-C205	18,0	500
12	Manipulador Telescópico (BOBCAT T40140)	Perkins 1104D-44TA	8,2	250
13	Perforadora (BOBCAT / Varios)	Kubota V2203-M-DI	8,2	250
14	Rodillo Compactador (HAMM HD 90)	Deutz TCD 2012 L04 2V	10,5	500
15	Retroexcavadora (NEW HOLLAND B110B)	CNH 445TA/EGH	12,5	500
16	Topadora (DRESSTA TD-15M)	Cummins QSC 8.3	26,0	500
17	Cargadora Frontal (XCMG LW600K)	Cummins QSL8.9	35,0	250

Fuente: Elaboración propia en base a manuales técnicos de fabricantes.

G. FORMULACIÓN DEL MODELO DE ESTIMACIÓN

El modelo se basa en el principio de conservación de la materia aplicado al sistema de lubricación del motor de cada equipo durante un período de análisis determinado (Tchobanoglous et al., 1994). En este sistema, la masa que ingresa es el aceite lubricante nuevo cargado en cada service (cuyo volumen está especificado en el manual técnico del fabricante), la masa que sale es el ALU recuperado en cada cambio, y la diferencia corresponde a las pérdidas operativas incorporadas al modelo a través del Factor de Recuperación Operativa (F_p).

La masa que INGRESA	Es el aceite lubricante nuevo cargado en cada service, cuyo volumen está especificado en el manual técnico del fabricante.
La masa que SALE	Es el ALU que se recupera en cada cambio de aceite.
La DIFERENCIA ENTRE AMBAS	Corresponde a las pérdidas operativas (evaporación, combustión por desgaste de sellos, retención en filtros, pequeñas fugas).

Este enfoque permite estimar la cantidad de residuo que debería haberse generado a partir de datos de entrada conocidos, sin necesidad de medirlo directamente (Tchobanoglous et al., 1994). Es precisamente esa capacidad de estimación indirecta e independiente la que lo convierte en una herramienta útil para el control ambiental: el regulador construye su propio valor de referencia sin depender de lo que el generador declara.

Este concepto establece que todo el aceite virgen que ingresa al sistema debe ser contabilizado al final de su vida útil, ya sea como residuo recuperado o como pérdida por consumo natural del motor.

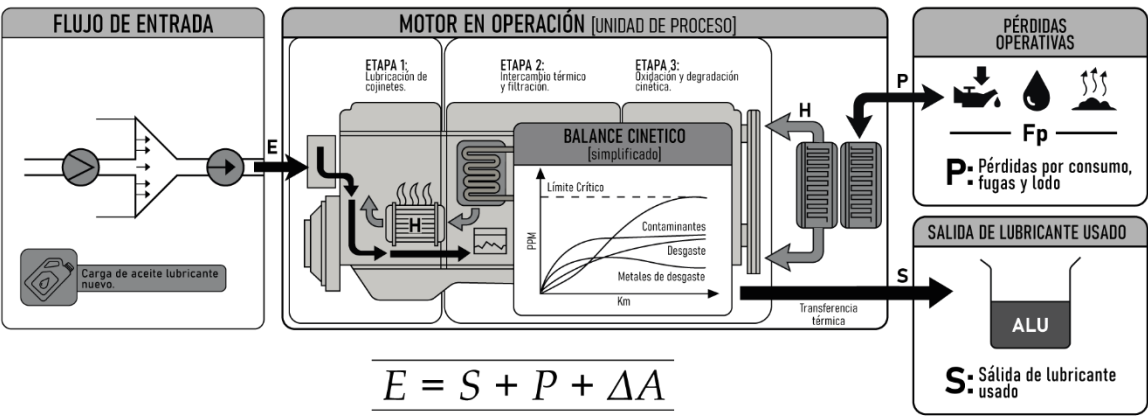


Gráfico 12 - Diagrama de balance de masas y cinética de degradación del lubricante en motores de maquinaria vial. El esquema representa la unidad de proceso (cárter) bajo la ley de conservación de la materia ($\$E = S + P + \Delta A$), detallando los flujos de entrada de aceite virgen, las pérdidas por volatilidad, fugas y lodos ($\$Fp$), y la salida final de residuo peligroso (ALU). El recuadro central ilustra la cinética de acumulación de contaminantes respecto al tiempo de operación hasta alcanzar el límite crítico. Fuente: Elaboración propia en Adobe Illustrator en base a la metodología de balance de materiales de Tchobanoglous et al. (1994).

1. Función piso

Un aspecto matemático central del modelo es la utilización de la función piso para determinar el número de cambios de aceite computables en el período analizado. Los cambios de aceite son eventos discretos, no continuos: un equipo no puede haber realizado 2,2 cambios, realizó 2 cambios completos y lleva horas adicionales con aceite nuevo que aún está en uso al cierre del período. Ese aceite nuevo no ha sido drenado, no ha salido del motor y no constituye ALU generado: contabilizarlo como residuo sería técnicamente incorrecto y jurídicamente cuestionable, porque implicaría que el modelo exige declarar un residuo que físicamente aún no existe.

La función piso, notada con los corchetes $\lfloor \]$, devuelve el mayor entero menor o igual al cociente calculado. Si un equipo trabajó 1.100 horas con un intervalo efectivo de 500 horas, el cociente es 2,2 pero el número de cambios completados es $\lfloor 1.100/500 \rfloor = 2$. Operar con el cociente decimal en lugar del entero implicaría atribuir al período una fracción de residuo físicamente no producida aún, distorsionando la estimación al alza y desvirtuando el carácter de piso mínimo del modelo. Al utilizar exclusivamente los cambios completados, el modelo no sobreestima en ningún caso la generación esperada, lo que refuerza su solidez: si la declaración queda por debajo de un valor que ya es el mínimo posible sin fracciones, la inconsistencia es técnicamente indefendible.

2. Fórmula individual por equipo

La Generación Real Esperada de ALU para el equipo i durante el período de análisis se expresa como:

$$GRE_i = \left\lfloor \frac{H_i}{I_i \cdot F_{co}} \right\rfloor \cdot C_i \cdot F_p$$

Donde GRE_i es la Generación Real Esperada del equipo i en litros por período analizado;

$\lfloor H_i / (I_i \cdot F_{co}) \rfloor$ es el número entero de cambios de aceite completados durante el período;

H_i son las horas operativas del equipo i durante el período;

I_i es el intervalo de cambio para condiciones normales según el manual del fabricante en horas;

F_{co} es el Factor de Condición Operativa que ajusta el intervalo a las condiciones reales del obrador;

C_i es la capacidad nominal del cárter de motor en litros según el fabricante;

y F_p es el Factor de Recuperación Operativa fijado en 0,90.

3. Fórmula de la sumatoria total para el parque

Cuando el análisis se extiende al conjunto de equipos que opera la empresa vial, la Generación Real Esperada total del parque se obtiene sumando la GRE individual de cada equipo:

$$GRE_{total} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_i}{I_i \cdot F_{co}} \right] \cdot C_i \cdot F_p$$

Donde n es el número total de equipos del parque analizado. Este valor es el que se compara directamente con el volumen de ALU declarado por la empresa ante el ente regulador en su declaración jurada anual. Si el volumen declarado es igual o superior a la GRE_{total} calculada, la declaración es consistente y no genera alerta. Si la discrepancia supera el umbral establecido, el protocolo de inspección profunda se activa.

4. Factor de Recuperación Operativa (F_p)

No todo el aceite lubricante nuevo que ingresa al motor se recupera como ALU al momento del cambio. Una fracción se consume durante la operación por distintas vías: evaporación a alta temperatura, combustión interna por desgaste de retenes o sellos, pequeñas fugas por juntas y conexiones, y retención en filtros y sedimentos (Tchobanoglous et al., 1994). En equipos en buen estado de mantenimiento, la bibliografía técnica internacional establece que la proporción de recuperación se ubica entre el 80% y el 90% del aceite cargado al inicio del intervalo (Tchobanoglous et al., 1994).

Para el modelo se fija $F_p=0,90$, asumiendo que se recupera el 90% del aceite cargado (el valor más alto del rango y el más favorable para el generador). La consecuencia técnica de esta elección es directamente relevante para la solidez del protocolo: cualquier discrepancia detectada entre la GRE calculada y el volumen declarado no podrá atribuirse a una sobreestimación de las pérdidas operativas por parte del modelo, lo que hace que cualquier alerta activada sea técnicamente inobjetable desde la perspectiva del generador.

5. Factor de Condición Operativa (F_{co})

Los manuales técnicos de los fabricantes de maquinaria pesada establecen frecuentemente dos valores distintos para el intervalo de cambio de aceite según las condiciones de operación: un intervalo estándar y un intervalo reducido para condiciones de uso severo. Las condiciones de uso severo incluyen, según los criterios de los principales fabricantes del sector: operación en ambientes con alta concentración de polvo o suciedad; temperaturas ambiente sostenidamente superiores a 38°C; trabajo continuo a carga máxima del motor; y combustible con alto contenido de azufre. Cuando concurre

una o más de estas condiciones, el fabricante recomienda reducir el intervalo de cambio, típicamente a la mitad del valor normal.

El sector vial mendocino reúne estructuralmente estas condiciones: los obradores operan en entornos de tierra, polvo y material pétreo; Mendoza registra temperaturas estivales recurrentemente superiores a 38°C; y los equipos de movimiento de suelos y compactación trabajan frecuentemente a carga máxima sostenida. Aplicar el intervalo de condiciones normales como referencia universal introduciría un sesgo técnico sistemático que subestimaría el número real de cambios realizados (potencialmente a la mitad) enmascarando subdeclaraciones reales dentro del umbral de tolerancia.

Para corregir ese sesgo de manera controlada y documentable, el modelo incorpora el F_{co} , que modifica el intervalo I de la fórmula según las condiciones verificadas en el obrador:

$$I_{efectivo} = I_{fabricante} \cdot F_{co}$$

El F_{co} adopta dos valores operativos:

a. $F_{co}=1,0$ - Condiciones normales.

Aplicable cuando el equipo opera con baja exposición al polvo, temperaturas moderadas y cargas variables. En el sector vial mendocino es de aplicación excepcional y debe ser justificado documentalmente por el inspector con observación directa consignada en el registro de inspección.

b. $F_{co}=0,5$ - Condiciones de uso severo.

Valor de aplicación por defecto para el sector vial mendocino. Su uso implica que el intervalo efectivo es la mitad del nominal: si el fabricante recomienda 500 horas en condiciones normales, el modelo asume 250 horas bajo condiciones severas. Dado que este valor está directamente respaldado por los propios manuales de los fabricantes, su aplicación es técnicamente inobjetable y jurídicamente sostenible en el marco de un procedimiento de fiscalización.

6. Aplicación escalonada del Factor de Condición Operativa:

Con el objetivo de asegurar la equidad del procedimiento y evitar una postura excesivamente agresiva hacia el administrado, el protocolo prevé una aplicación escalonada del F_{co} en dos etapas.

En la primera etapa, el inspector aplica el modelo con $F_{co}=1,0$, es decir, utilizando el intervalo de condiciones normales del fabricante (el más favorable posible para el generador). Si incluso bajo esta premisa el volumen declarado no alcanza el valor de GRE calculada, la subdeclaración queda técnicamente demostrada sin posibilidad de impugnación basada en criterios de mantenimiento o condiciones operativas: la empresa no puede argumentar que el modelo es agresivo si fue aplicado con el intervalo más largo que el fabricante contempla.

En la segunda etapa, si la primera estimación no activa la alerta, el inspector aplica $F_{co}=0,5$, correspondiente a las condiciones reales de uso severo verificadas en el obrador. Esta segunda aplicación refleja la generación esperada bajo las condiciones técnicas efectivamente prevalentes y constituye el valor de referencia definitivo del protocolo. Esta estrategia protege al administrado de aplicaciones precipitadas del umbral y hace que las detecciones de subdeclaración persistentes en la primera etapa sean irrefutables.

7. Criterio de estimación mínima

El modelo opera deliberadamente como estimación mínima de la generación real de ALU. El valor de GRE calculado representa el piso por debajo del cual la declaración de una empresa no puede ubicarse sin generar una inconsistencia técnica evidente. Esta condición se sostiene en tres pilares simultáneos: el valor $F_p=0,90$ que asume las pérdidas operativas más bajas del rango aceptable; el alcance exclusivo sobre el aceite de motor, dejando fuera los sistemas hidráulico, de transmisión y mandos finales que también generan ALU; y el uso del intervalo efectivo según F_{co} , que aun en condiciones severas utiliza el límite inferior del rango publicado por el fabricante, permaneciendo conservador respecto de posibles adelantos de service no documentados. Los tres pilares actúan en el mismo sentido: el modelo subestima sistemáticamente la generación real, lo que hace que cualquier declaración que quede por debajo de la GRE calculada sea técnicamente indefendible.

8. Fundamentación cuantitativa del umbral de alerta

Para que el umbral de alerta sea técnicamente sostenible y no arbitrario, es necesario cuantificar las fuentes de variabilidad real del modelo. Las fuentes de incertidumbre técnica identificables en su aplicación sobre datos de campo son las siguientes:

FUENTE DE VARIABILIDAD	DESVÍO MÁX. ESTIMADO
<i>Error de lectura o registro del horómetro (desfases en toma de lectura, registros aproximados en hojas de servicio)</i>	$\pm 5\%$ <i>sobre H</i>
<i>Diferencia entre capacidad nominal del cárter y volumen real cargado (imprecisiones de llenado, temperatura, retención residual)</i>	$\pm 3\%$ <i>sobre C</i>
<i>Aceite retenido en filtro y paredes del motor al momento del cambio, no recuperado en el drenaje</i>	$\pm 2\%$ <i>sobre el vol. recuperable</i>
<i>Variación del intervalo real de cambio respecto del intervalo de referencia (adelantos o atrasos dentro de márgenes operativos normales)</i>	$\pm 5\%$ <i>sobre $[H/I]$ efectivo]</i>
ERROR TÉCNICO ACUMULADO MÁXIMO	$\approx 10 - 15\%$

La suma de estas fuentes de variabilidad, consideradas en su valor máximo simultáneo, produce un error técnico acumulado del modelo de aproximadamente 10 a 15%.

Este es el margen de imprecisión esperable en cualquier aplicación del modelo sobre datos de campo, incluso cuando todos los actores actúan de buena fe. A partir de ese análisis, se fija el umbral de alerta en el 20% de discrepancia entre la GRE_{total} calculada y el volumen declarado. Este valor supera en al menos cinco puntos porcentuales el error técnico acumulado máximo: una discrepancia del 20% o mayor prácticamente no puede explicarse por imprecisiones técnicas del modelo ni por variabilidades normales de los datos de campo. A ese nivel, la hipótesis de subdeclaración intencional es la explicación técnicamente más plausible.

Formalmente, el criterio de activación del protocolo de inspección profunda se expresa:

$$\text{Si } \frac{GRE_{total} - V_{declarado}}{GRE_{total}} \geq 0,20 \rightarrow \text{ALERTA: iniciar protocolo de inspección profunda.}$$

Donde $V_{declarado}$ es el volumen de ALU informado por la empresa en su declaración jurada anual para el período analizado. El umbral del 20% es una propuesta técnicamente fundamentada que la DGFA puede revisar y ajustar en función de la experiencia acumulada con la aplicación del protocolo.

H. PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN CRUZADA

La principal vulnerabilidad técnica del modelo reside en la integridad de la variable H . Un horómetro adulterado (mediante alteración física del instrumento, omisión deliberada de registros de operación o presentación de hojas de servicio con horas subregistradas) produciría un valor artificialmente bajo de H , reduciendo proporcionalmente la GRE calculada y enmascarando una subdeclaración real dentro del umbral de tolerancia. Esta vulnerabilidad no invalida el modelo, sino que subraya que ningún sistema técnico de control puede operar de manera aislada: su eficacia depende de la calidad e integridad de los datos sobre los que se aplica (Tchobanoglous et al., 1994).

Para mitigarla, el protocolo incorpora un procedimiento de verificación cruzada basado en tres fuentes de información independientes:

1. Contraste con partes de obra.

Las horas del horómetro deben ser coherentes con las horas consignadas en los partes de obra presentados ante el comitente de cada contrato ejecutado durante el período. Los partes de obra son documentos contractuales en poder del comitente (Vialidad Provincial, Dirección de Obras Públicas, municipios) completamente independientes de la empresa fiscalizada y de alta confiabilidad como fuente de contraste.

2. Contraste con registros de consumo de combustible.

El consumo de combustible de un equipo diesel es técnicamente predecible a partir de las horas de operación: los fabricantes publican rangos de consumo horario en litros por hora que permiten estimar el combustible esperado para las horas declaradas. Si el consumo real registrado en facturas o remitos de provisión de combustible es significativamente inferior al

esperado, eso constituye un indicio técnico de subregistro horométrico, dado que no es posible sostener las horas declaradas con una cantidad de combustible notoriamente insuficiente para sustentarlas.

3. Contraste con órdenes de trabajo del taller.

Las órdenes de trabajo de mantenimiento del taller propio o del concesionario de servicio oficial registran fecha y valor del horómetro al momento de cada intervención. La progresión cronológica de esas lecturas debe ser consistente con el horómetro declarado al cierre del período: lecturas del taller superiores al horómetro final declarado en el registro general indican de manera inequívoca una alteración del registro.

Si los datos de las tres fuentes son consistentes entre sí y con el horómetro declarado, la integridad de H puede considerarse razonable y el protocolo avanza a la comparación con la GRE calculada. Si existen discrepancias significativas, ese hallazgo constituye un indicio de primer orden con entidad propia para sustentar el inicio de un procedimiento administrativo, independientemente del resultado de la comparación con la GRE .

I. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Para demostrar el comportamiento del modelo bajo distintas condiciones operativas y evaluar su capacidad discriminatoria, el caso de aplicación simulado se desarrolla bajo tres escenarios de intensidad operativa, definidos en función de las horas anuales de trabajo asignadas a cada equipo:

Escenario A - Uso Intensivo: entre 1.500 y 2.000 horas anuales por equipo, representativo de empresas con obra continua durante la mayor parte del año y contratos de gran envergadura. En el contexto mendocino corresponde a contratistas con licitaciones de ruta en ejecución permanente.

Escenario B - Uso Moderado: entre 800 y 1.200 horas anuales por equipo, correspondiente a empresas con actividad estacional o parque en espera entre contratos consecutivos. Es el escenario más frecuente en empresas medianas del sector vial provincial.

Escenario C - Uso Mínimo: entre 300 y 500 horas anuales por equipo, representativo de empresas con baja actividad, parque parcialmente inmovilizado o en mantenimiento programado. Sirve como límite inferior para verificar que el modelo no genera alertas falsas sobre empresas con actividad genuinamente baja y declaraciones coherentes con ella.

J. MÉTODOS DE ANÁLISIS

El procesamiento y análisis de los datos se efectúa mediante cuatro métodos complementarios.

1. **Aplicación directa del modelo de balance de masas:** la fórmula $GRE_i = [H_i / (I_i \cdot F_{co})] \cdot C_i \cdot F_p$ se aplica equipo por equipo bajo cada escenario, y los resultados se organizan en la Matriz de Control, que constituye tanto el instrumento de registro del método como el producto operativo entregable del protocolo.
2. **Análisis de escenarios de subdeclaración hipotética:** para cada escenario operativo se simulan distintos niveles de omisión de declaración (expresados como porcentaje de la GRE_{total} no declarada: 0%, 10%, 20%, 30% y 50%) evaluando en cuáles de esos niveles el criterio del 20% es activado. El resultado es una tabla de detección que demuestra la capacidad discriminatoria del protocolo bajo condiciones controladas y constituye la verificación empírica de la hipótesis de trabajo.
3. **Análisis de sensibilidad del modelo:** se evalúa cómo varía la GRE_{total} ante cambios controlados en cada variable de entrada ($\pm 10\%$ en H , $\pm 5\%$ en C y cambio de F_{co} entre 0,5 y 1,0), identificando la variable más sensible del modelo y cuantificando el impacto de su eventual manipulación. Este análisis fundamenta la priorización de los controles documentales en la inspección de campo.
4. **Validación de coherencia con referencia sectorial:** en caso de que los datos sectoriales agregados de la DGFA o del SIMEL resulten accesibles, se realiza una comparación de orden de magnitud entre los volúmenes estimados por el modelo y los volúmenes de referencia disponibles. Si esos datos no resultan accesibles, los resultados del trabajo descansan íntegramente sobre los tres métodos anteriores, dado el carácter autocontenido del modelo.

K. LIMITACIONES DEL MODELO

Todo modelo de estimación tiene limitaciones que deben reconocerse explícitamente para que su aplicación sea técnicamente honesta (Tchobanoglous et al., 1994).

1. **Alcance sobre sistemas de lubricación:**
El modelo considera exclusivamente el aceite de motor y no contempla los fluidos hidráulicos, de transmisión y mandos finales. Esta decisión es deliberada y fortalece el carácter de piso mínimo, pero implica que la GRE calculada es siempre inferior a la generación real total del equipo. La incorporación de los sistemas complementarios queda planteada como línea de trabajo futuro.
2. **Asunción sobre frecuencia de service:**
El modelo asume que los services se realizan según el intervalo del fabricante ajustado por F_{co} . Si una empresa adelanta los cambios (frecuente en el trabajo vial exigente) la generación real será mayor que la estimada, lo que no representa un problema dado el criterio de estimación mínima. Si los services se realizan con menor frecuencia que la recomendada, la empresa estaría además incurriendo en un incumplimiento de su programa de mantenimiento

preventivo, con consecuencias directas desde la perspectiva de la Higiene, Seguridad y Calidad.

3. Integridad de los datos de entrada:

La confiabilidad del modelo depende de que la variable H sea íntegra. Un horómetro adulterado reduce proporcionalmente la *GRE* calculada y enmascara subdeclaraciones reales, vulnerabilidad que el procedimiento de verificación cruzada descrito está diseñado para mitigar.

CONCLUSIONES

La validación del modelo se realiza sobre una flota simulada de diez equipos de maquinaria pesada autopropulsada, seleccionados por representar la composición básica de cualquier obra vial de mediana escala. El parque incluye equipos de distintos fabricantes y tipologías (compactación, carga, nivelación, pavimentación, fresado, excavación) lo que permite demostrar que el modelo opera con la misma lógica sobre cualquier equipo del que se disponga el manual técnico, sin depender de una marca específica ni de un tipo de motor particular. La diversidad de fabricantes es un argumento deliberado de simplicidad: si el protocolo funciona con este parque heterogéneo, su aplicación a cualquier flota del sector no introduce complejidad metodológica adicional.

Los parámetros técnicos de cada equipo (capacidad nominal del cárter (C) e intervalo de cambio para condiciones normales (I), fueron extraídos directamente de los manuales técnicos originales de los respectivos fabricantes. La variable operativa (H) se construye mediante simulación para cada escenario. En todos los cálculos se aplica $F_{co} = 0,5$ (condiciones de uso severo, valor por defecto para el sector vial mendocino) y $F_p = 0,90$ (factor de recuperación operativa más favorable para el generador dentro del rango técnicamente aceptable). El intervalo efectivo de cada equipo resulta de $I_{efectivo} = I_{fabricante} \times 0,5$.

Tabla 2. Base de datos técnica del parque simulado

Nº	Equipo/Modelo	Fabricante	Motor	C (L)	I fab.hs	I _{ef.} F _{co} =0,5/hs
1	Compactador Neumático GRW 280	Hamm	Deutz TCD 2012 L04 2V	12,5	500	250
2	Cargadora Frontal ZL50G / LW500K	Xcmg	Weichai WD10G220E21	20,0	500	250
3	Cargadora Frontal CLG856	Liugong	Cummins 6CT8.3	28,5	500	250
4	Motoniveladora 120K	Caterpillar	Cat C7 ACERT	15,0	500	250
5	Motoniveladora STG190C-8	Sany	Cummins 6BTAA5.9-C205	18,0	500	250
6	Terminadora de Asfalto Super 1800-3	Vogele	Cummins QSB6.7	13,0	500	250
7	Fresadora de Pavimento W 100	Wirtgen	Deutz TCD 2012 L04 2V	10,0	500	250
8	Rodillo Compactador HD 90	Hamm	Deutz TCD 2012 L04 2V	10,5	500	250
9	Retroexcavadora B110B	New holland	CNH 445TA/EGH	12,5	500	250
10	Mini Cargadora S130	Bobcat	Kubota V2203-M-DI	8,1	250	125

Fuente: Elaboración propia en base a manuales técnicos de fabricantes.

Escenario A - Uso intensivo

($H=1.750$ horas anuales por equipo)

Este escenario representa empresas con obra continua durante la mayor parte del año.

Con un intervalo efectivo de 250 horas para los equipos con $I_{fabricante}=500$ horas, cada uno de esos equipos completa $[1.750/250] = 7$ cambios en el período. La Mini Cargadora BOBCAT S130, con $I_{efectivo}=125$ horas, completa $[1.750/125] = 14$ cambios.

Tabla 3. Matriz de Control - Escenario A: Uso Intensivo ($H=1.750$ hs, $F_c=0,5$, $F_p=0,90$)

Nº	Equipo	C (L)	I _{ef} (hs)	H	Nº Cambios	GRE _i (L)
1	Compactador Neumático HAMM GRW 280	12,5	250	1.750	7	78,8
2	Cargadora Frontal XCMG ZL50G/LW500K	20,0	250	1.750	7	126,0
3	Cargadora Frontal LIUGONG CLG856	28,5	250	1.750	7	179,6
4	Motoniveladora CAT 120K	15,0	250	1.750	7	94,5
5	Motoniveladora SANY STG190C-8	18,0	250	1.750	7	113,4
6	Terminadora de Asfalto VOGELE Super 1800-3	13,0	250	1.750	7	81,9
7	Fresadora WIRTGEN W 100	10,0	250	1.750	7	63,0
8	Rodillo Compactador HAMM HD 90	10,5	250	1.750	7	66,2
9	Retroexcavadora NEW HOLLAND B110B	12,5	250	1.750	7	78,8
10	Mini Cargadora BOBCAT S130	8,1	125	1.750	14	102,1
GRE_{total} - Escenario A						984,3 L

GRE_{total} Escenario A	<i>984,3 litros anuales</i>
Umbral de alerta (GRE×0,80)	<i>787,4 litros</i>

Escenario B - Uso moderado

($H=1.000$ horas anuales por equipo)

Este escenario representa empresas con actividad estacional o parque en espera entre contratos.

Los equipos con $I_{efectivo}=250$ horas completan $[1.000/250]=4$ cambios. La Mini Cargadora con $I_{efectivo}=125$ horas completa $[1.000/125]=8$ cambios.

Tabla 4. Matriz de Control - Escenario B: Uso Moderado ($H=1.000$ hs, $F_{co}=0,5$, $F_p=0,90$)

Nº	Equipo	C (L)	I _{ef} (hs)	H	Nº Cambios	GRE _i (L)
1	Compactador Neumático HAMM GRW 280	12,5	250	1.000	4	45,0
2	Cargadora Frontal XCMG ZL50G/LW500K	20,0	250	1.000	4	72,0
3	Cargadora Frontal LIUGONG CLG856	28,5	250	1.000	4	102,6
4	Motoniveladora CAT 120K	15,0	250	1.000	4	54,0
5	Motoniveladora SANY STG190C-8	18,0	250	1.000	4	64,8
6	Terminadora de Asfalto VOGELE Super 1800-3	13,0	250	1.000	4	46,8
7	Fresadora WIRTGEN W 100	10,0	250	1.000	4	36,0
8	Rodillo Compactador HAMM HD 90	10,5	250	1.000	4	37,8
9	Retroexcavadora NEW HOLLAND B110B	12,5	250	1.000	4	45,0
10	Mini Cargadora BOBCAT S130	8,1	125	1.000	8	58,3
GRE_{total} - Escenario B						562,3 L

GRE_{total} Escenario B	<i>562,3 litros anuales</i>
Umbral de alerta (GRE×0,80)	<i>449,8 litros</i>

Escenario C - Uso Mínimo

($H = 400$ horas anuales por equipo)

Este escenario representa empresas con baja actividad, parque parcialmente inmovilizado o contexto de contracción sectorial.

Los equipos con $I_{efectivo}=250$ horas completan $[400/250]=1$ cambio. La Mini Cargadora con $I_{efectivo}=125$ horas completa $[400/125]=3$ cambios.

Tabla 5. Matriz de Control — Escenario C: Uso Mínimo ($H=400$ hs, $F_{co}=0,5$, $F_p=0,90$)

Nº	Equipo	C (L)	I _{ef} (hs)	H	Nº Cambios	GRE _i (L)
1	Compactador Neumático HAMM GRW 280	12,5	250	400	1	11,3
2	Cargadora Frontal XCMG ZL50G/LW500K	20,0	250	400	1	18,0
3	Cargadora Frontal LIUGONG CLG856	28,5	250	400	1	25,7
4	Motoniveladora CAT 120K	15,0	250	400	1	13,5
5	Motoniveladora SANY STG190C-8	18,0	250	400	1	16,2
6	Terminadora de Asfalto VOGELE Super 1800-3	13,0	250	400	1	11,7
7	Fresadora WIRTGEN W 100	10,0	250	400	1	9,0
8	Rodillo Compactador HAMM HD 90	10,5	250	400	1	9,5
9	Retroexcavadora NEW HOLLAND B110B	12,5	250	400	1	11,3
10	Mini Cargadora BOBCAT S130	8,1	125	400	3	21,9
GRE_{total} - Escenario C						148,1 L

GRE_{total} Escenario C	<i>148,1 litros anuales</i>
Umbral de alerta (GRE×0,80)	<i>118,5 litros</i>

Tabla 6. Síntesis de GRE por escenario - Parque de 10 equipos

ESCENARIO	H anual/equipo	GRE_{total} (L)	Umbral alerta 80% (L)	Volumen mínimo de subdeclaración detectable (L)
A – Uso intensivo	1.750 hs	984,3	787,4	196,9
B - Uso moderado	1.000 hs	562,3	449,8	112,5
C - Uso mínimo	400 hs	148,1	118,5	29,6

La columna "volumen mínimo de subdeclaración detectable" indica el volumen de ALU no declarado a partir del cual el protocolo activa la alerta, equivalente al 20% de la GRE_{total} en cada escenario.

A. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis de trabajo sostiene que el modelo permite detectar subdeclaraciones de ALU en empresas viales. Para verificarla se simulan distintos niveles de subdeclaración hipotética sobre cada escenario, evaluando en qué casos el criterio del 20% es activado. La subdeclaración hipotética se define como el porcentaje de la GRE_{total} que el generador ficticio omite declarar: 0%, 10%, 20%, 30% y 50%.

Tabla 7. Análisis de detección de subdeclaración hipotética por escenario

NIVEL DE SUBDECLARACIÓN	$V_{decl. A}$ (L)	¿Alerta A?	$V_{decl. B}$ (L)	¿Alerta B?	$V_{decl. C}$ (L)	¿Alerta C?
0% - Declaración íntegra	984,3	NO	562,3	NO	148,1	NO
10% no declarado	885,9	NO	506,1	NO	133,3	NO
20% no declarado	787,4	NO	449,8	NO	118,5	NO
30% no declarado	689,0	SI	393,6	SI	103,7	SI
50% no declarado	492,2	SI	281,2	SI	74,1	SI

NOTA: El nivel del 20% exacto corresponde al umbral; la discrepancia es igual al límite. En la práctica, constituye una señal de atención que habilita al inspector a solicitar documentación adicional antes de avanzar al procedimiento de inspección profunda.

El modelo detecta correctamente, en los tres escenarios, que las declaraciones íntegras y las que presentan variaciones dentro del error técnico acumulado (hasta el 10%) no generan alerta. Asimismo, detecta con consistencia que subdeclaraciones del 30% y del 50% constituyen inconsistencias

técnicas que superan ampliamente el margen de error del modelo y activan el protocolo. Esto se verifica independientemente del nivel de actividad del parque, desde el escenario de uso intensivo hasta el de uso mínimo, lo que demuestra que la capacidad discriminadora del protocolo no depende de la escala operativa de la empresa analizada.

B. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

Para evaluar la robustez del modelo ante variaciones en sus datos de entrada, se analiza el impacto de modificaciones controladas en cada variable sobre la GRE_{total} del Escenario B (uso moderado, $GRE_B=562,3$ litros) tomado como caso base por ser el más representativo de la actividad habitual del sector.

Tabla 8. Análisis de sensibilidad

Escenario B como caso base ($GRE_B=562,3$ L)

VARIABLE MODIFICADA	VARIACIÓN APLICADA	GRE resultante (L)	DIFERENCIA VS. BASE	VARIACIÓN %
H - horas operativas	-10% (H = 900hs)	506,1	-56,2	-10,0%
H - horas operativas	+10% (H = 1.100hs)	562,3*	0,0	0,0%*
C - capacidad cárter	-5% en todos los equipos	534,2	-28,1	-5,0%
C - capacidad cárter	+5% en todos los equipos	590,4	+28,1	+5,0%
F_{co}	1,0 en lugar de 0,5	281,2	-281,1	-50,0%
F_p	0,80 en lugar de 0,90	499,8	-62,5	-11,1%

**NOTA: La variación de +10% en H no modifica la GRE en este caso porque la función piso absorbe el incremento sin completar cambios adicionales en la mayoría de los equipos del parque.*

El análisis de sensibilidad revela que la variable de mayor impacto sobre la GRE es el F_{co} : un cambio de 0,5 a 1,0 reduce la GRE exactamente a la mitad. Esto confirma que la determinación correcta del F_{co} es la decisión técnica más crítica del protocolo de inspección y justifica la estrategia de aplicación escalonada: si la empresa puede demostrar con documentación que sus condiciones operativas corresponden a condiciones normales, la GRE de referencia se reduce significativamente; si no puede demostrarlo, el $F_{co}=0,5$ es técnicamente inobjetable conforme a los propios manuales de los fabricantes.

La variable H , por su parte, muestra una relación aproximadamente lineal con la GRE (una reducción del 10% en H produce una reducción del 10% en la GRE), lo que ilustra con claridad la sensibilidad del modelo a la manipulación del horómetro y fundamenta la importancia estructural del procedimiento de verificación cruzada. Un subregistro del 10% en H podría desplazar una discrepancia real del 30% (que activa la alerta) a una discrepancia aparente del 22%, que también la activa, pero con menor margen, subrayando que los controles documentales de H no son una formalidad sino un componente crítico del protocolo.

C. PROPUESTA DE MEJORA

El resultado central de este trabajo no es solo un conjunto de cálculos sobre un parque simulado. Es la demostración de que existe una herramienta técnica simple, replicable y jurídicamente sostenible que la DGFA puede adoptar como protocolo estandarizado de control activo sobre generadores de ALU en el sector vial. Esa herramienta se compone de dos elementos inseparables: la fórmula de estimación de Generación Real Esperada con función piso y factores de ajuste, y la Matriz de Control que la operacionaliza en un instrumento de campo.

La implementación institucional del protocolo implicaría, en términos prácticos, incorporar la Matriz de Control como herramienta de pre-auditoría al procedimiento de recepción y análisis de declaraciones juradas anuales. El inspector completa la matriz con los datos del parque declarado (verificables contra los manuales de los fabricantes, de dominio público) y con las horas de operación declaradas; calcula la GRE_{total} del parque; la compara con el volumen de ALU informado; y aplica el criterio del 20% para determinar si la declaración es consistente o si amerita inspección de campo con solicitud de documentación adicional.

Este procedimiento no requiere infraestructura tecnológica adicional, no depende de la voluntad colaborativa de los generadores para la obtención de los parámetros técnicos de base, y opera enteramente dentro del marco que la normativa vigente (Ley N°5.917, Decreto N°2.625/99, Resolución N°667/08 y Ley N°5.961) ya le otorga a la DGFA para el ejercicio de su poder de policía ambiental. Lo que el protocolo aporta es precisamente lo que ese marco no tenía: el estándar técnico de referencia que convierte al inspector en un auditor activo.

Para las empresas que operan bajo un Sistema de Gestión Ambiental certificado conforme a la norma ISO 14001:2015, la adopción voluntaria del modelo como herramienta de autocontrol interno resuelve de manera concreta los requisitos de cuantificación de aspectos ambientales significativos (cláusula 6.1.2) y de seguimiento del desempeño ambiental (cláusula 9.1). El mismo instrumento que el regulador utiliza para controlar puede ser utilizado por la empresa para demostrar que su gestión es coherente y transparente, lo que convierte al modelo en una herramienta de doble utilidad cuyo beneficio final es el mismo en ambos casos: mayor trazabilidad, menor riesgo ambiental y un sistema de gestión de residuos peligrosos más confiable.

D. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El presente trabajo partió de la identificación de una brecha estructural en el sistema de gestión de residuos peligrosos de la provincia de Mendoza: la ausencia de un mecanismo técnico que permitiera al ente regulador verificar de manera independiente si los volúmenes de aceites lubricantes usados declarados por las empresas viales eran coherentes con su actividad real. Esa brecha no era consecuencia de un vacío normativo (el marco legal provincial es relativamente completo) sino de la inexistencia de una herramienta técnica de referencia que tradujera las obligaciones normativas en un estándar operativo de control.

El modelo propuesto responde directamente a esa necesidad. A partir de la aplicación del principio de conservación de la materia al sistema de lubricación del motor de la maquinaria pesada, y utilizando como datos de entrada exclusivamente parámetros de los manuales técnicos de los fabricantes (documentos de dominio público verificables de manera independiente) el modelo produce un valor de Generación Real Esperada de ALU que el inspector puede calcular antes de recibir la declaración de la empresa. Ese valor convierte al proceso de control en una instancia activa: el regulador llega a la inspección con su propio parámetro de referencia, no a esperar lo que el generador informa.

La aplicación del modelo al parque simulado de diez equipos de distintos fabricantes demostró que la diversidad de marcas y tipologías no introduce complejidad metodológica: el protocolo opera con la misma lógica sobre cualquier equipo del que se disponga el manual técnico. Los resultados numéricos concretos fueron: una GRE_{total} de 984,3 litros anuales bajo uso intensivo, de 562,3 litros bajo uso moderado y de 148,1 litros bajo uso mínimo.

La hipótesis de trabajo queda verificada. El análisis de detección de subdeclaración hipotética demostró que el modelo detecta correctamente, en los tres escenarios, subdeclaraciones del 30% y del 50% sin generar alertas falsas sobre declaraciones íntegras ni sobre variaciones dentro del margen de error técnico acumulado del modelo (cuantificado en aproximadamente 10 a 15%). La capacidad discriminatoria del protocolo es consistente independientemente del nivel de actividad del parque, desde el escenario de uso intensivo hasta el de uso mínimo. Al incorporar una línea de control técnico independiente al sistema de declaración existente, los datos que circulan en el registro provincial ganan en confiabilidad: el modelo no solo detecta irregularidades, sino que, por su sola existencia como protocolo estandarizado, eleva el costo esperado de la subdeclaración para el generador que pretenda cometerla y reduce el incentivo para intentarla.

La estrategia garantista del modelo ($F_p=0,90$, alcance exclusivo sobre el aceite de motor, y aplicación escalonada del F_{co} comenzando con el escenario más favorable para el generador) hace al protocolo no solo técnicamente robusto sino también equitativo en términos de procedimiento administrativo. Las detecciones de subdeclaración que persisten incluso bajo los supuestos más favorables para el generador son técnicamente indefendibles y jurídicamente sostenibles para sustentar un procedimiento de inspección profunda o una actuación administrativa.

Quedan identificadas como líneas de trabajo futuro la extensión del modelo a los sistemas hidráulico, de transmisión y mandos finales (lo que incrementaría la GRE estimada y haría el protocolo aún más

comprehensivo); la completitud del relevamiento de manuales para alcanzar el parque de veinte equipos originalmente propuesto; la validación del protocolo sobre datos horométricos y manifiestos reales de empresas del sector mediante acuerdo institucional con la DGFA; y el desarrollo de una herramienta digital simple (planilla de cálculo, APP o formulario web) que facilite la implementación sistemática de la Matriz de Control por parte de los inspectores del organismo regulador.

El modelo propuesto no pretende reemplazar la inspección de campo ni el criterio del inspector. Pretende darle a ese inspector lo que hoy no tiene: un número propio, técnicamente fundamentado, con el que llegar a la instancia de control. En la gestión ambiental, como en cualquier sistema de auditoría, la diferencia entre el control pasivo y el control activo no es solo operativa. Es la diferencia entre un sistema que depende de la buena fe del generador y uno que puede prescindir de ella.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). (2020). Estadísticas e informes de residuos en Europa: Marco y metodologías. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu>

Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (1997). Perfil toxicológico del aceite de cárter mineral usado. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU., Servicio de Salud Pública. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp102.pdf>

Argentina. (1991). Ley N° 24.051: Régimen de Residuos Peligrosos. Honorable Congreso de la Nación Argentina. Boletín Oficial de la República Argentina, 27 de enero de 1992.

Argentina. (1993). Decreto N° 831/1993: Reglamentación de la Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos. Poder Ejecutivo Nacional. Boletín Oficial de la República Argentina, 3 de mayo de 1993.

Argentina. (2002). Ley N° 25.675: Ley General del Ambiente — Presupuestos mínimos para la gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable. Honorable Congreso de la Nación Argentina. Boletín Oficial de la República Argentina, 28 de noviembre de 2002.

Asociación de Fabricantes de Equipos (AEM). (2021). Perspectivas de la industria de equipos y parámetros de utilización. AEM. <https://www.aem.org>

BOBCAT Company. (2018). Manual de servicio: Cargadora compacta Bobcat S130. Doosan Bobcat North America.

BOBCAT Company. (2019). Manual de servicio: Cargadora compacta Bobcat S450. Doosan Bobcat North America.

BOBCAT Company. (2020). Manual de operación y mantenimiento: Manipulador telescópico Bobcat T40140. Doosan Bobcat North America.

Caterpillar Inc. (2017). Manual de operación y mantenimiento: Motoniveladora Cat 120K (SEBU8257). Caterpillar Inc.

Comité Europeo de Equipos de Construcción (CECE). (2020). Informe anual: La industria de equipos de construcción en Europa — Cifras clave y tasas de utilización. CECE. <https://www.cece.eu>

Deutz AG. (2019). Manual de taller: Motores serie TCD 2012 L04 2V. Deutz AG.

DRESSTA. (2016). Manual de operación y mantenimiento: Topadora sobre orugas Dressta TD-15M. DRESSTA Co., Ltd.

HAMM AG. (2018). Instrucciones de operación y mantenimiento: Rodillo tándem Hamm HD 90. HAMM AG — Wirtgen Group.

HAMM AG. (2019). Instrucciones de operación y mantenimiento: Rodillo neumático Hamm GRW 280. HAMM AG — Wirtgen Group.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO 14001:2015: Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso. ISO.

LIUGONG Machinery Co., Ltd. (2018). Manual de operación y mantenimiento: Cargadora frontal LiuGong CLG856. LIUGONG Machinery Co., Ltd.

Benito, A. O., y Arena, A. P. (2022). Análisis del flujo de materiales de una red de simbiosis industrial en Mendoza, Argentina. AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN, 15.

Mendoza, Provincia de. (1992). Ley Provincial N° 5.917: Adhesión de la provincia de Mendoza a la Ley Nacional N° 24.051 de Residuos Peligrosos. Honorable Legislatura de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (1992). Ley Provincial N° 5.961: Preservación del Medio Ambiente de la Provincia de Mendoza. Honorable Legislatura de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (1994). Decreto Provincial N° 2.109/1994: Reglamentación de la Ley Provincial N° 5.961. Poder Ejecutivo de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (1999). Decreto Provincial N° 2.625/1999: Reglamentación de la Ley Provincial N° 5.917 de Residuos Peligrosos. Poder Ejecutivo de la Provincia de Mendoza. Boletín Oficial de la Provincia de Mendoza, 8 de febrero de 2000.

Mendoza, Provincia de. (2002). Decreto Provincial N° 851/2002: Modificación del Decreto N° 2.625/99. Poder Ejecutivo de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (2008). Resolución N° 667/2008: Procedimiento de inscripción en el Registro Provincial de Generadores, Transportistas y Operadores de Residuos Peligrosos e incorporación de la figura del Operador In Situ. Secretaría de Medio Ambiente de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (2010). Decreto Provincial N° 212/2010: Modificación del Decreto N° 2.625/99. Poder Ejecutivo de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (2011). Resolución N° 542/2011: Modificación del artículo 3° de la Resolución N° 667/08 sobre requisitos de prueba piloto para operadores in situ. Secretaría de Medio Ambiente de la Provincia de Mendoza.

Mendoza, Provincia de. (2013). Decreto Provincial N° 809/2013: Modificación del Decreto N° 2.109/94 reglamentario de la Ley N° 5.961. Poder Ejecutivo de la Provincia de Mendoza.

NEW HOLLAND Agriculture & Construction. (2016). Manual del operario: Retroexcavadora New Holland B110B. CNH Industrial.

SANY Group Co., Ltd. (2019). Manual de operación y mantenimiento: Motoniveladora Sany STG190C-8. SANY Group Co., Ltd.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2019). Guía para la gestión de residuos peligrosos: Generadores, transportistas y operadores (2.ª ed.). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación Argentina.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. A. (1994). Gestión integral de residuos sólidos (Vol. I). McGraw-Hill.

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (2012). Programa de gestión de aceites usados: Guía técnica para estimar las tasas de generación de aceite usado. EPA-530-F-12-001. Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos.

Vázquez-Duhalt, R. (1989). Impacto ambiental del aceite de motor usado. Science of the Total Environment, 79(1), 1–23. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90151-8)

VOGELE — Joseph Vögele AG. (2018). Instrucciones de operación: Pavimentadoras Super 1800-3 y Super 1300-3. Joseph Vögele AG — Wirtgen Group.

Weichai Power Co., Ltd. (2017). Manual de servicio: Motor diésel WD10G220E21. Weichai Power Co., Ltd.

WIRTGEN GmbH. (2019). Manual de operación y mantenimiento: Fresadora en frío Wirtgen W 100. WIRTGEN GmbH — Wirtgen Group.

XCMG Group. (2018). Manual de operación y mantenimiento: Cargadora frontal XCMG ZL50G / LW500K. XCMG Construction Machinery Co., Ltd.

XCMG Group. (2020). Manual de operación y mantenimiento: Cargadora frontal XCMG LW600K. XCMG Construction Machinery Co., Ltd.

ANEXO I

Matriz de Control de Generación de ALU (*Formulario de Campo*)

DATOS GENERALES DEL OPERATIVO DE INSPECCIÓN

Nombre de la Empresa / Generador:	Fecha de aplicación: / /
CUIT / CUIL:	Período Analizado: / /
Nombre del Inspector actuante:	

ID Equipo	Tipo de Maquinaria	Capacidad Cárter (C) [Lts]	Intervalo de Cambio (I) [Hs]	Horas de Operación (H) [Hs]	Factor Recuperación (F _p)	Generación Esperada (GRE) [L]
1					0,90	
2					0,90	
3					0,90	
4					0,90	
5					0,90	
6					0,90	
7					0,90	
8					0,90	
9					0,90	
10					0,90	
11					0,90	
12					0,90	
13					0,90	
14					0,90	
15					0,90	
<i>GRE_{total}</i>	Sumatoria de Generación Estimada					<i>[Σ GRE]</i>

OBSERVACIONES: _____

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO II

Ficha Técnica de extracción de parámetros de manual.

RELEVAMIENTO TÉCNICO DE PARÁMETROS DE FABRICANTE		N° Ficha: _____
Denominación del Equipo:		
Marca:	Modelo:	
Número de Serie / Interno:		
Sección del Manual Consultada:		
PARÁMETROS DE MANTENIMIENTO DEL MOTOR		
Capacidad de Cáster Relevada (C):	Lts	
Intervalo de Cambio Normal (<i>I normal</i>):	Hs	
Intervalo de Cambio Severo (<i>I severo</i>):	Hs	
ESPECIFICACIONES DEL LUBRICANTE RECOMENDADO		
Clasificación API:	(Ej: CK-4 / CJ-4)	
Grado SAE:	(Ej: 15W-40)	
VALIDACIÓN DEL RELEVAMIENTO		
_____ <i>Nombre del Inspector:</i>		_____ <i>Firma:</i>

Fuente: Elaboración propia.