



**ANÁLISIS GENERAL DE IMPACTOS
ECONÓMICOS Y SOCIALES
PARA NORMA DE MEDICIÓN DE NÚMERO
DE PARTÍCULAS**

Documento de ANÁLISIS GENERAL DE IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES PARA NORMA DE MEDICIÓN DE NÚMERO DE PARTÍCULAS

Este documento ha sido elaborado para el Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA) en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 1) financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE y ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico - Swisscontact

El presente documento es de carácter informativo y no necesariamente refleja los puntos de vista u opiniones de las organizaciones y gobiernos participantes.

Las denominaciones utilizadas y la presentación del material de esta publicación no implican en lo absoluto la expresión de ninguna opinión sobre el estatus legal de un país, territorio, ciudad o área, sobre sus autoridades.

Lo contenido en este documento debe ser estudiado con cuidado, por las entidades o gobiernos interesados, considerando las condiciones locales propias (ej. riesgos para salud, viabilidad tecnológica, aspectos económicos, factores políticos y sociales, nivel de desarrollo, la capacidad nacional o local, entre otros).

Elaborado por:

Mijahil Aliosha Reinoso Durán - Experto en emisiones vehiculares (consultor)

Revisado por:

Nancy Manríquez, Encargada de Regulación de Fuentes Móviles, MMA

Danae Orellana, Profesional del Departamento de Economía Ambiental, MMA

Nicolás Trivelli, Profesional del Departamento de Economía Ambiental, MMA

Carol Arenas, Coordinadora en Chile del Programa CALAC+

Freddy Koch, Coordinador Componente Programa CALAC+

Adrián Montalvo, Director Programa CALAC+

Imagen de Portada:

N/A

Edición: versión febrero 2021

LOS TEXTOS PUEDEN SER MENCIONADOS TOTAL O PARCIALMENTE CITANDO LA FUENTE

Tabla de contenido

ACRÓNIMOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ALCANCES.....	8
3. DEFINICIÓN DE LA NORMA TÉCNICA.....	10
3.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	10
3.2. DISCUSIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y LÍMITE MÁXIMO.....	13
4. MODELACIÓN DE LAS EMISIONES.....	19
4.1. AJUSTE A UN MODELO DE REGRESIÓN LINEAL.....	19
4.2. ESTIMACIÓN DE LAS TASAS DE RECHAZO.....	22
4.3. ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN.....	25
4.4. CÁLCULO DE EMISIONES.....	29
4.5. RESULTADOS.....	36
5. ANÁLISIS DE IMPACTO SOCIAL Y ECONÓMICO.....	39
5.1. ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	39
5.2. CAMBIO EN LAS CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS.....	45
5.3. ESTIMACIÓN DE EFECTOS.....	46
5.4. TASAS DE INCIDENCIA BASE.....	47
5.5. VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS.....	48
6. RESULTADOS.....	50
7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	51
ANEXO 1: GRÁFICOS Y ESTADÍSTICA.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	60

ACRÓNIMOS

AGIES	: ANÁLISIS GENERAL DE IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL
AM	: REPUESTO ALTERNATIVO (SIGLAS EN INGLÉS)
B/C	: INDICADOR BENEFICIO/COSTO
BC	: CARBONO NEGRO (SIGLAS EN INGLÉS)
COPERT	: MODELO DE CÁLCULO DE EMISIONES DE LA UNIÓN EUROPEA
DPF	: FILTRO DE PARTÍCULAS DIÉSEL
DTPM	: DIRECCIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO METROPOLITANO
EC	: CARBONO ELEMENTAL (SIGLAS EN INGLÉS)
ESTRAUS	: MODELO DE TRANSPORTES DEL MINISTERIO DE TRANSPORTES DE CHILE
EURO	: ESTÁNDAR DE EMISIONES EUROPEO PARA VEHÍCULOS PESADOS DESDE EURO I A EURO VI
FEC	: FACTOR EMISIÓN CONCENTRACIÓN
MMA	: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
MMFR	: MAQUINARIA MÓVIL FUERA DE RUTA
MODEM	: MODELO DE EMISIONES DEL TRANSPORTE DEL MINISTERIO DE TRANSPORTES DE CHILE
MP10	: MATERIAL PARTICULADO DE 10 MICRAS O MENOR
MP2.5	: MATERIAL PARTICULADO DE 2.5 MICRAS O MENOR
MTT	: MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES
NP	: NÚMERO DE PARTÍCULAS
OCDE	: ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO
OE	: EQUIPO ORIGINAL DE FÁBRICA (SIGLAS EN INGLÉS)
OM	: MATERIAL ORGÁNICO (SIGLAS EN INGLÉS)
PPDA	: PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA REGIÓN METROPOLITANA
RM	
PRT	: PLANTA DE REVISIÓN TÉCNICA
RED	: RED METROPOLITANA DE MOVILIDAD (EX TRANSANTIAGO)
RPM	: REVOLUCIONES POR MINUTO DEL MOTOR
SEREMI	: SECRETARÍA REGIONAL MINISTERIAL
TI	: TASA DE INCIDENCIA BASE
VAN	: VALOR NETO ACTUALIZADO
VEV	: VALOR ESTADÍSTICO DE LA VIDA

1. INTRODUCCIÓN

La Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente introdujo, al momento de su promulgación, el análisis técnico y económico como parte del proceso de elaboración de las normas de emisión y planes de prevención y descontaminación. Actualmente el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) y el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), de conformidad con el Artículo 15 del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana- PPDA RM (DS N°31/2017 del MMA), tienen previsto implementar métodos de control de emisiones del número de partículas (NP) para motores diésel en uso¹, en la flota de transporte público, y que cuenten con filtro de partículas diésel (DPF). Es así como el objetivo general del presente estudio es elaborar el Análisis General de Impactos Económicos y Sociales (AGIES), que apoye el proceso de elaboración de la norma de NP en buses de transporte público que cuenten con filtro de partículas diésel, y genere todos los antecedentes técnicos necesarios y que resulten de la definición de la norma. En tal sentido, los objetivos específicos que se señalan en los Términos de Referencia respectivos son los siguientes:

- i. Caracterizar los impactos sociales y económicos debido a la aplicación de la normativa.
- ii. Evaluar los costos incrementales asociados a la implementación del anteproyecto de norma, evaluando los gastos adicionales, y sistema de monitoreo y fiscalización. Proyectar y modelar dichos costos en el horizonte de evaluación de la norma.
- iii. Evaluar los beneficios asociados a la implementación de la norma, en términos de reducción de emisiones de la flota. Proyectar y modelar dichas emisiones en el horizonte de evaluación de la norma.
- iv. Elaborar la relación costo/beneficio de la implementación de la norma.
- v. Elaborar el documento de análisis, incluyendo las planillas de cálculo y modelos elaborados.

Para cumplir con los objetivos planteados, se propone como marco metodológico el descrito en el documento “Guía Metodológica de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire” [GREENLAB 2013]. No obstante, para abordar este análisis, queda pendiente como paso previo, la definición técnica de la norma, la que debe considerar la especificación de los instrumentos de medición y sus protocolos de calibración y mantenimiento, el procedimiento de ensayo (condiciones para la realización de la prueba) y el límite máximo permisible. Todos aspectos que inciden en los costos y beneficios del análisis. Para tal efecto se llevará a cabo un análisis detallado de las definiciones de normas extranjeras de referencia, ya existentes para el control de NP, junto con las mediciones

¹ Para el control de emisiones de vehículos en uso existe en Chile el Decreto Supremo N°4/1994 que establece dos instancias de control, revisión técnica periódica y control en vía pública. El consultor considera necesario abordar ambas instancias de control en la evaluación.

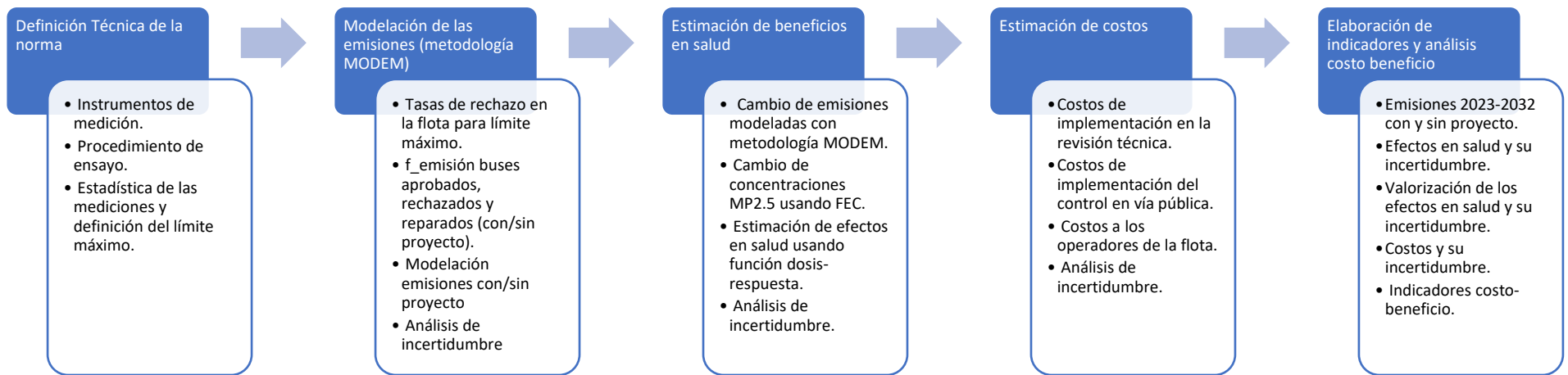
disponibles para una muestra de buses de la flota RED, lo que permitirá inferir los impactos de la norma sobre el parque y sus emisiones.

Adicionalmente, para desarrollar la metodología AGIES se tienen que abordar dos aspectos generales: la estimación de los beneficios y la estimación de los costos de la medida. Respecto de los costos se considerarán aquellos incrementales, incurridos por agentes públicos y privados en la implementación y desarrollo de la norma. A manera de ejemplo se considerarán los de inversión, operación y mantención de los equipos de medición, tanto para la revisión técnica como para el control en vía pública. A estos se deben agregar los costos de reparación de los vehículos rechazados por incumplimiento del límite de emisiones, valorados según precios sociales, tal como recomienda el Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

Para la estimación de los beneficios, y según la guía metodológica [GREENLAB 2013], se llevarán a cabo los siguientes pasos:

- Se estimarán las emisiones con y sin proyecto de norma (cambio de emisiones).
- Con base en el cambio de las emisiones se estimará, mediante un modelo lineal simple (roll back), el impacto de éste en las concentraciones atmosféricas (cambio en concentraciones).
- A su vez, mediante el uso de funciones dosis-respuesta, se estimarán los efectos en la población, del cambio en las concentraciones atmosféricas del contaminante en estudio (MP2.5).
- Se valorizarán los efectos en términos monetarios.
- Se estimarán los costos de implementación de la medida.

Ilustración 1: Diagrama general de la metodología propuesta para el estudio.



2. ALCANCES

Respecto de los alcances del estudio a desarrollar, estos se describen en detalle a continuación:

Tipo de Fuente y alcance geográfico:

El análisis que se propone considera los alcances indicados en los TdR del estudio, esto es que la medida a evaluar puede aplicar a todos los buses de transporte público RED, específicamente a los buses con motor diésel y filtro de partículas diésel, tales como EURO VI, EURO III + DPF de fábrica y los EURO III reacondicionados con DPF². A continuación, se muestra la flota RED con la cantidad de buses en estas categorías y como se puede ver en la Tabla 1, la regulación prevista aplicaría a más del 50% de la flota.

Tabla 1: Flota RED a diciembre de 2020

TECNOLOGÍA	FLOTA	APLICA NORMA NP
ELÉCTRICO	783	NO
EPA 98 O EURO III	1081	NO
EPA 98 O EURO III CON DPF ⁽¹⁾	2113	SI
EURO IV	1	NO
EURO V	1331	NO
EURO VI	1459	SI
TOTAL	6981	

Nota (1): Incluye buses EURO III reacondicionados con DPF y aquellos con DPF de fábrica (EURO III+DPF), reportados en el Registro de Transporte Público.

Fuente: Consolidado Registro de Transporte Público Región Metropolitana diciembre 2020.

Dado lo anteriormente expuesto, el alcance geográfico para el estudio propuesto considera la aplicación de la medida en toda la Región Metropolitana. Lo anterior aplica respecto de la población afectada por las reducciones en las concentraciones de MP2.5, con proyecto, y por tanto de las tasas de incidencia base que permiten estimar los efectos en salud.

² Conforme el estado del arte en el desarrollo de la regulación de NP, para control de emisiones en revisión técnica (PTI) y vía pública, este se focaliza en la medición a motores diésel con DPF [BURTSCHER 2019]. No obstante, como parte del estudio el consultor podrá ahondar en la posibilidad de los otros motores diésel sin DPF.

Escenarios de Análisis y contaminantes considerados.

Los escenarios de evaluación se generan a partir de la aplicación o no de un estándar en número de partículas para los buses RED con DPF, que controle en un ciclo de Inspección/Mantenimiento, las fallas en el DPF. Por lo anterior se debe considerar como línea base el deterioro histórico de los DPF, reflejado en las emisiones de partículas³ de la flota en estudio y su proyección al horizonte de evaluación. Específicamente en el contaminante criterio afectado por este tipo de fallas y que cuenta con valores para los impactos en salud, esto es el MP2.5⁴. A su vez el escenario con proyecto considera la implementación de la medida a contar del 2023, afectando la fracción de buses con DPF con falla y evitando emisiones de MP2.5 a partir de este año. En este sentido se definen los escenarios de análisis, para el MP2.5, a un horizonte de 10 años a contar del 2023, con y sin proyecto de norma. Correspondientemente con el tipo de fuente (flota de buses RED y su entorno de operación), se considerará para el estudio de los efectos en salud, la población de la Región Metropolitana o más específicamente de la Provincia de Santiago más las comunas de Puente Alto y San Bernardo, según el nivel de detalle de la información disponible por el mandante.

Definición de los efectos

Para la presente evaluación, se consideran los efectos ya contemplados en anteriores AGIES⁵, para el MP2.5, los que se señalan en la Tabla 2:

Tabla 2: Efectos en salud considerados para el análisis

EVENTO	CONTAMINANTE	DETALLE
Mortalidad	MP2.5	Cardiopulmonar largo plazo
Admisiones hospitalarias	MP2.5	Asma (crónica)
		Cardiovascular
		Respiratorias crónicas
		Neumonía
		Bronquitis
Visitas salas de emergencia	MP2.5	Bronquitis crónica
Productividad perdida	MP2.5	Asma
		Días laborales
		Días de actividad restringida

Fuente: Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de revisión de norma primaria de calidad del aire para material particulado respirable MP10 [AGIES 2017-1]. Tabla A.

³ La función del DPF es retener las partículas sólidas emitidas por el motor diésel.

⁴ Si bien NP cuenta con abundante información científica que avala los efectos toxicológicos en el organismo, la evaluación de impactos en salud requiere estudios epidemiológicos no disponibles para esta métrica en Chile, pero sí disponibles para MP2.5.

⁵ [AGIES 2016], [AGIES 2017-1]

3. DEFINICIÓN DE LA NORMA TÉCNICA

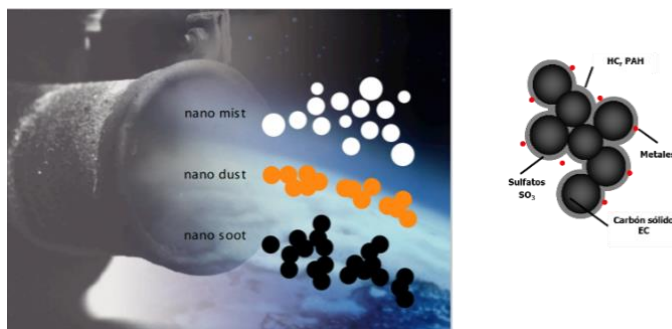
La disminución de las partículas diésel ha sido una prioridad en las regulaciones y programas de descontaminación en todo el mundo, lo que se está logrando, entre otros, con el uso de filtros de partículas. No obstante, la reducción de las partículas diésel a rangos mínimos, con el uso de esta tecnología en los motores modernos, ha significado un gran desafío para las técnicas de medición de emisiones. Las nuevas técnicas están apuntando a mayores niveles de sensibilidad para las bajas concentraciones de los motores modernos, y de repetibilidad y reproducibilidad necesarios para transformarse en estándar. El principio que orienta el nuevo concepto se resume como sigue: la medición del número de nanopartículas sólidas. Esto conlleva tres aspectos fundamentales: contar el número de partículas en vez que medir su masa, contar las partículas con tamaño nanométrico (~ 100 nm) y eliminar las sustancias volátiles para dejar sólo las partículas sólidas.

Desde el punto de vista de la fiscalización de vehículos en uso, uno de los principales desafíos ha sido contar con un equipo de medición con niveles de sensibilidad acordes a los rangos de emisión de estos motores. Considerando el rango de tamaño de las partículas diésel (<500 nm), los métodos ópticos tradicionales para la fiscalización en terreno, tal como la opacidad, no son útiles, ya que dicho rango se encuentra por debajo del límite de detección de la luz⁶.

3.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Las partículas diésel MP2.5 están morfológicamente constituidas por una fracción líquida o volátil formada principalmente por sulfatos e hidrocarburos condensados y otra fracción sólida formada por carbón sólido (hollín, carbono negro, black carbon o carbono elemental) y una pequeña fracción de partículas metálicas.

Ilustración 2: Morfología partículas diésel

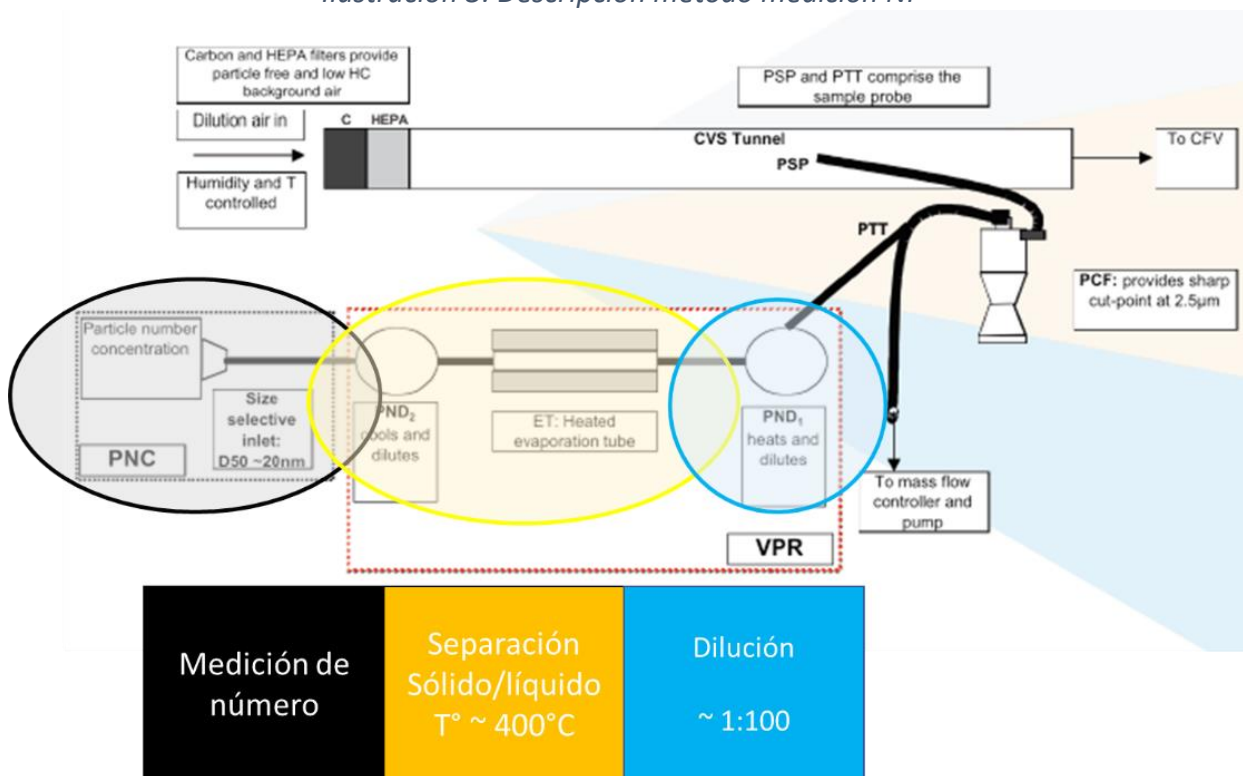


Fuente: M. Kasper. Misión a Chile

⁶ La norma que regula las especificaciones de los opacímetros en Chile define una longitud de onda de la fuente luminosa para la medición de 530 [nm].

Las nuevas regulaciones para la medición de las partículas diésel, establecieron mediante la Regulación N°83 de la Comisión Económica Europea (ECE), la medición del número de partículas sólidas, para el cumplimiento de la certificación de tipo u homologación, en los motores diésel de vehículos livianos y medianos. Los nuevos instrumentos desarrollados a partir de esta regulación deben considerar el tratamiento de la muestra necesaria para diluirla a un rango de concentración adecuada para el correcto funcionamiento del contador de partículas, además de disponer de un removedor de la fracción volátil, toda vez que la nueva métrica considera sólo el conteo de las partículas sólidas.

Ilustración 3: Descripción método medición NP



Fuente: M. Kasper. Misión a Chile

Esta nueva métrica, mucho más precisa y sensible para las bajas concentraciones de partículas de los motores modernos, ha empujado el desarrollo de nuevos instrumentos portátiles para la medición de NP, útiles para la fiscalización en la revisión técnica periódica y en la vía pública.

Desde el punto de vista técnico, las principales diferencias entre los nuevos desarrollos portátiles dicen relación con el sensor para conteo de partículas, el cual puede ser óptico (Condensation Particle Counter o CPC)⁷ o por difusión de carga eléctrica (Diffusion Charge o DC)⁸; y también se diferencian en el sistema para remover los volátiles (Volatile Particle Remover

⁷ Es un método óptico que incluye una fase de condensación previa en una atmósfera saturada de vapor de alcohol, para conseguir el aumento del tamaño de las partículas a rangos detectables por la luz.

⁸ Un sistema que ocupa el efecto corona para cargar eléctricamente las partículas y luego medir la corriente eléctrica generada por dichas partículas, como una función de la cantidad de partículas en el flujo.

o VPR), el cual puede ser mediante un separador catalítico que oxida las sustancias volátiles o un tubo evaporador.

Por último, existen dos sistemas de certificación disponibles en la legislación extranjera para estos instrumentos portátiles. Uno proviene de las regulaciones de los Países Bajos para el ensayo de filtros de partículas en inspección técnica y vía pública [TNO 2019], a cargo del Instituto Metrológico Holandés (NMI). El otro, de las regulaciones Suizas para la fiscalización de filtros de partículas en maquinaria de construcción [SR 941.242], a cargo del Instituto Metrológico Suizo (METAS). Es así como en la actualidad son varios los fabricantes de instrumentos que cuentan con equipos certificados, en fase de certificación o a nivel de prototipo (TSI, TESTO, NANEOS, SENSORS, TEN, etc.). A continuación, se presenta una lista de los instrumentos disponibles y sus características:

Tabla 3: Descripción instrumentos NP portátiles

MARCA	MODELO	SENSOR	VPR	PARÁM.	USO	CERTIFIC.	COSTO USD\$
TSI	NPET	CPC	SEPARADOR CATALÍTICO	• NÚMERO	• MMFR • IM	METAS	\$ 42.000
	APET	CPC	SEPARADOR CATALITICO	• NÚMERO	• IM	En curso NMI	
MAHA	SPC 8000	CPC	TUBO EVAPORADOR	• NÚMERO	• LAB	SIN INFORMACIÓN	
SENSORS	APB	CPC	TUBO EVAPORADOR	• NÚMERO	• IM	SIN INFORMACIÓN	
AVL	DITEST COUNTER	DC	TUBO EVAPORADOR	• NÚMERO	• IM	SIN INFORMACIÓN	
TESTO	NANOMET3	DC	TUBO EVAPORADOR	• NÚMERO • DIÁMETRO PROMEDIO • MASA • SUPERFICIE	• PEMS	SIN INFORMACIÓN	\$ 39.800
	PEPA		TUBO EVAPORADOR	• IDEM	• IM	METAS	
	DiSCmini		NO	• NÚMERO SOLID. Y VOLÁTILES	• AIRE	SIN INFORMACIÓN	
TEN	TEN AEM	CPC	TUBO EVAPORADOR	• NÚMERO	• IM	NMI	\$ 11.600
NANEOS	PARTECTOR	DC	EVAPORADOR	• NÚMERO • SUPERFICIE	• LABORAL	METAS	
PEGASOR	PPS-M (Sensor)	DC	SIN INFORMACIÓN	• NÚMERO	• IM • PEMS • LAB	SIN INFORMACIÓN	

RT: Revisión Técnica.

PEMS: Sistema Portable de Medición de Emisiones (Portable Emissions Measurement System).

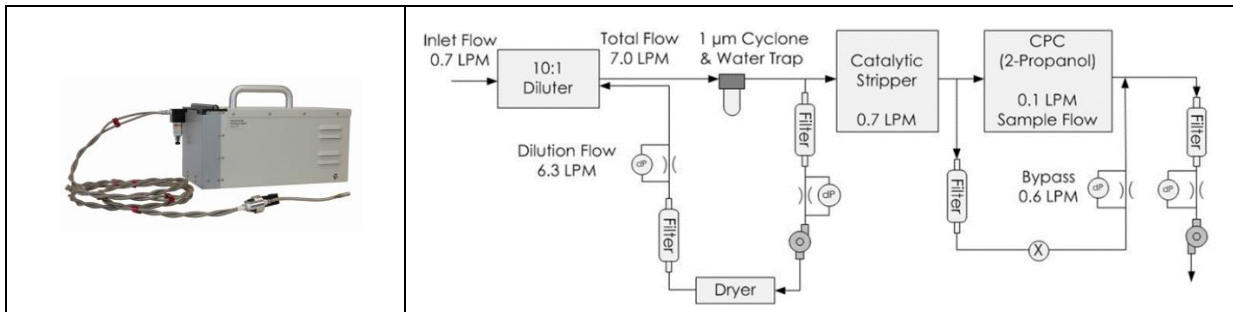
LAB: Laboratorio de Emisiones.

MMFR: Maquinaria Móvil Fuera de Ruta.

COSTO: Puesto en Chile, incluyendo costos de transporte, seguros, comisiones, etc, pero antes de impuestos (Fuente: Fabricantes TSI, TESTO y TEN).

Las principales especificaciones para los instrumentos de medición se detallan en las respectivas normas [WG 2019] y [SR 941.242].

Ilustración 4: Instrumento NPET medición NP



Fuente: TSI Instruments

3.2. DISCUSIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y LÍMITE MÁXIMO

Respecto del procedimiento de ensayo, es necesario discutir las alternativas ya incorporadas en las recomendaciones técnicas y regulaciones extranjeras tales como la medición en ralentí o en máxima RPM, reguladas en Países Bajos y Suiza respectivamente, y analizar sus implicancias en la implementación de la norma en Chile.

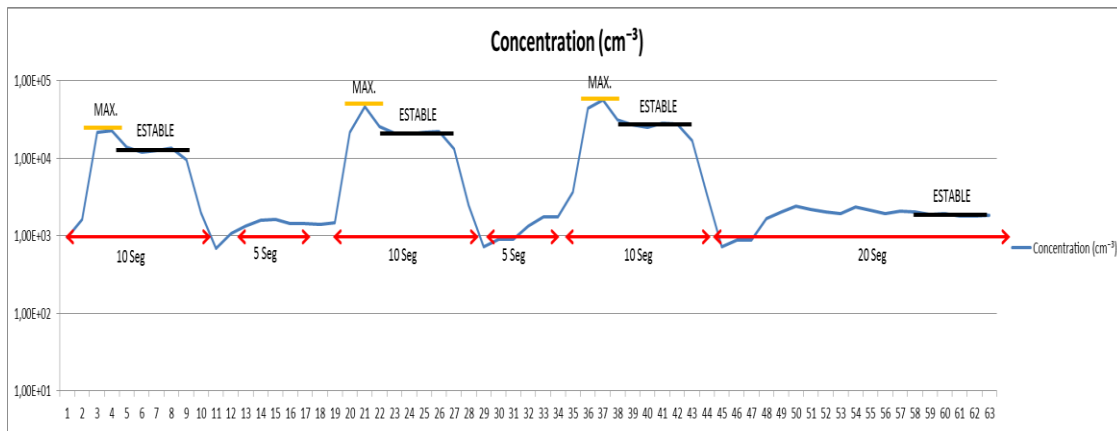
Antecedentes locales para la definición del procedimiento y límite máximo

En este sentido se cuenta con el estudio [GEASUR 2015], el que realizó cerca de 200 mediciones a los buses de RED (Transantiago en la época), con DPF.

Las pruebas consideraron la realización de un ciclo de operación en vacío del motor que incluía el ralentí, la aceleración instantánea a máxima RPM (tipo aceleración libre)⁹ y el valor estabilizado a máxima RPM como se muestra en la siguiente ilustración:

⁹ El método de aceleración libre, que realiza aceleraciones sucesivas a máxima inyección, es el actual procedimiento de medición en opacidad de los buses en revisión técnica y vía pública.

Ilustración 5: Ciclo medición NP



Fuente: [GEASUR 2015]

Las mediciones se realizaron en vía pública en conjunto con personal de fiscalización del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y su duración fue menor a 3 minutos cada una. Estas pruebas se combinaron con pruebas de emisiones de NP antes y después del DPF para calcular la eficiencia del DPF en 21 buses, en los patios de las empresas de transporte.

A priori se estableció una preferencia por la prueba en ralentí dada su simplicidad sobre el método de aceleración libre, el que requiere de la intervención del operador de la máquina para su correcta realización y por las dificultades que presenta en motores modernos con corte de inyección en vacío a bajas RPM. Se trató de responder la pregunta si era suficientemente sensible el instrumento para detectar fallas en los DPF sin necesidad de acelerar el motor.

El estudio concluye que, considerando las distribuciones de las mediciones en ralentí, los resultados permiten detectar la separación entre dos grupos o modos de la distribución: la de filtros buenos y la de filtros con posibles desperfectos. Adicionalmente, de la observación en terreno se parecía que la medición en ralentí no presenta problemas con aquellos motores modernos que cuentan con control electrónico de corte de inyección para aceleraciones en vacío.

El valor de referencia que surge naturalmente al observar la distribución de resultados en ralentí es de 220.000 [p/cm³]. Valor que es comparado con los resultados de eficiencia en ralentí medidos en patio, obteniéndose que el valor de referencia propuesto opera adecuadamente como predictor de los filtros con baja eficiencia (<95%), sin errores de comisión.

Tabla 4: Resultados mediciones estudio [GEASUR 2015]

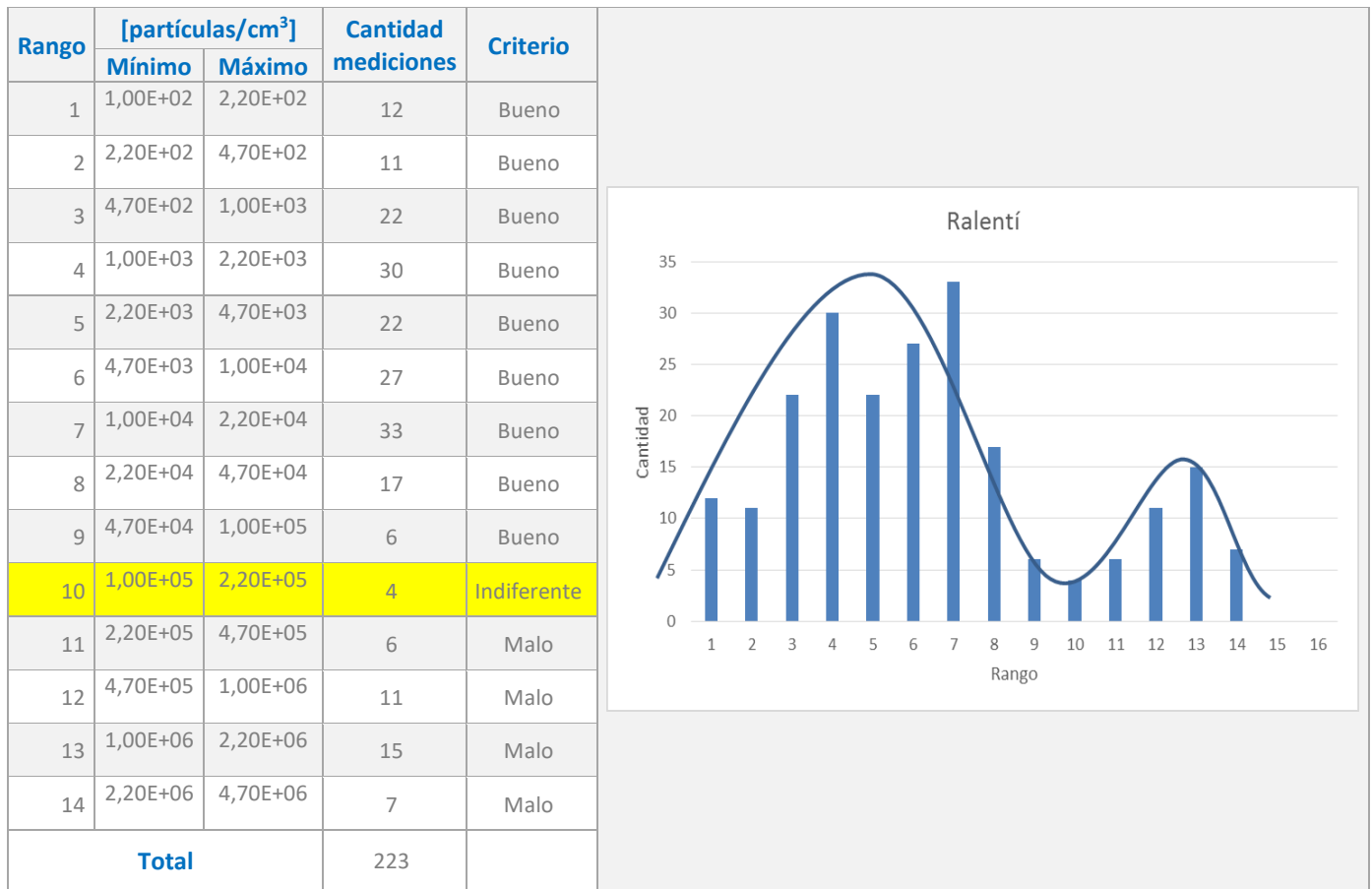
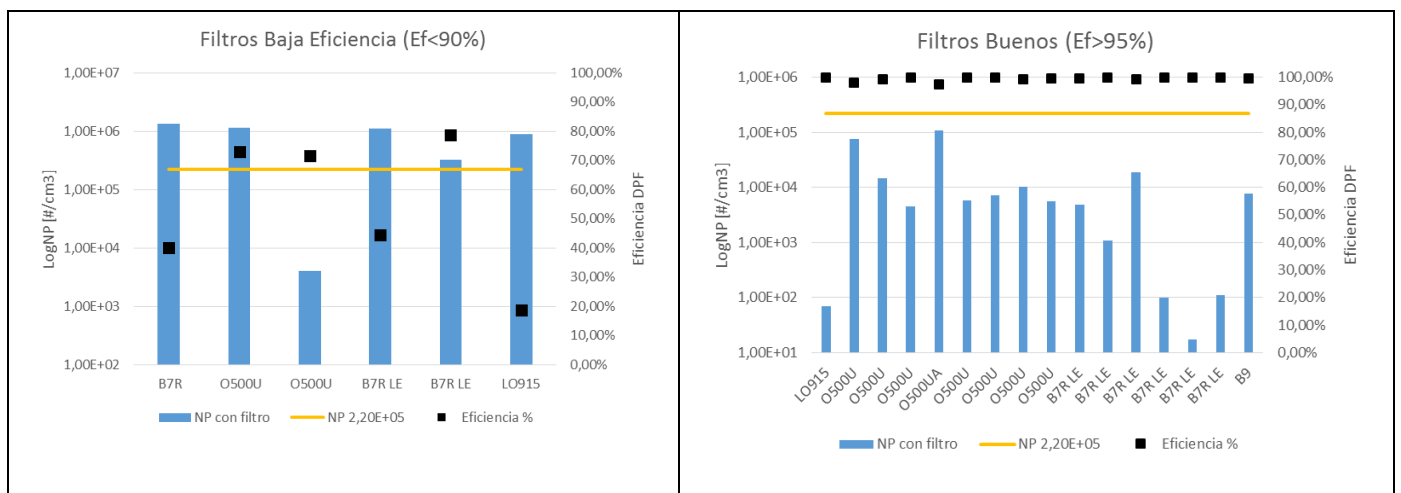


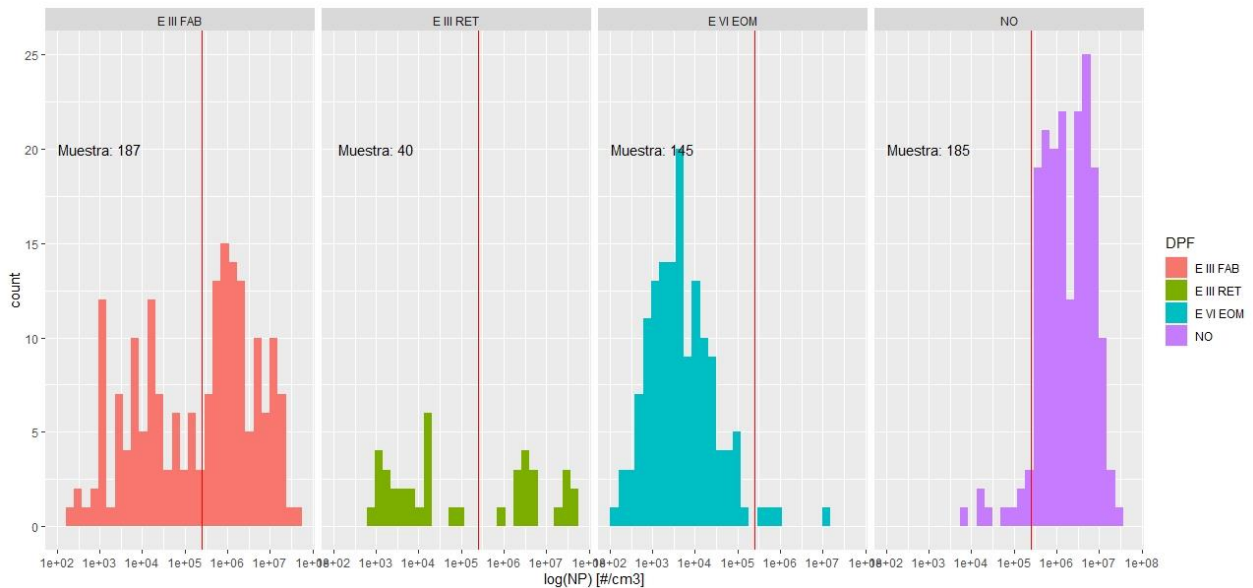
Ilustración 6: Resultados eficiencia en medición NP



Fuente: [GEASUR 2015]

A los resultados anteriores ahora se puede agregar cerca de 400 mediciones realizadas durante el año 2020, por la empresa Purexhaust y DTPM, que incluyen buses EURO VI con DPF como equipo original de fábrica. Se utilizará en adelante, como límite propuesto un valor muy cercano al establecido en el estudio [GEASUR 2015], de 250.000 [p/cm³], considerando las recomendaciones internacionales al respecto, las que se detallan más adelante en el informe.

Ilustración 7: Comparación de los resultados de las mediciones de NP en 600 buses de la flota RED. La línea roja indica el límite de 250.000 [p/cm³]

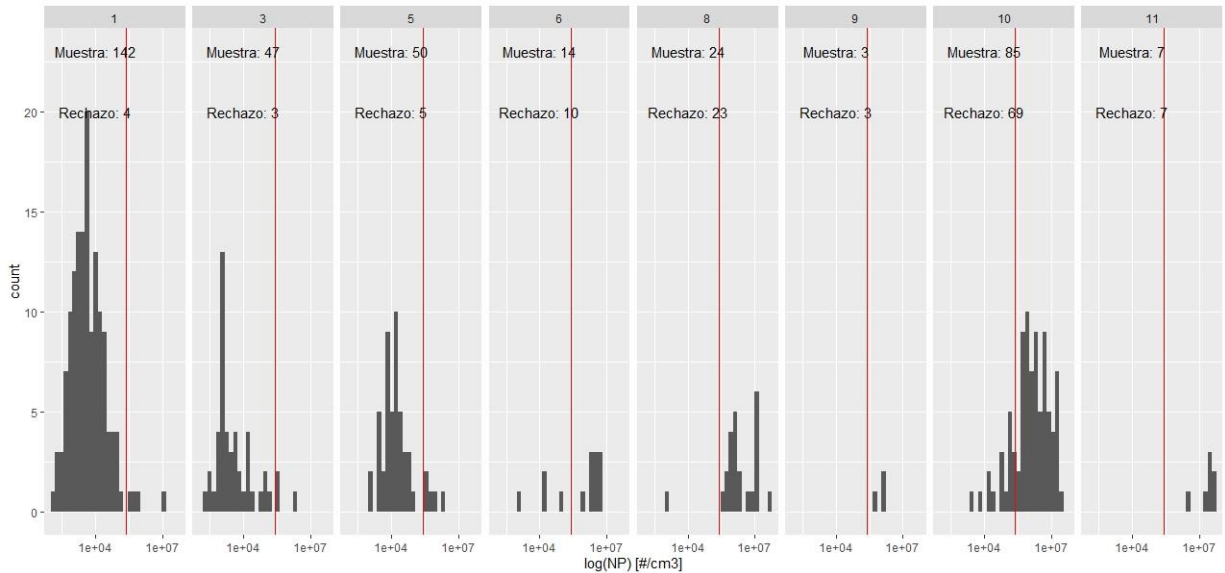


Nota: EURO III con DPF de fábrica (EURO III FAB), EURO III reacondicionados con DPF (EURO III RET), buses EURO VI con DPF (EURO VI EOM) y buses sin DPF (NO)

En la Ilustración 7 anterior, se observa cómo la población de buses sin DPF se encuentra por sobre del límite (95% sobre), la población de buses con DPF nuevo (EURO VI EOM), por debajo del límite (98% bajo) y los buses con DPF de diversa antigüedad, presentan una distribución bimodal (52% sobre, para DPF de fábrica y 43% sobre, para reacondicionados), con un modo por sobre el límite (filtros dañados) y otra por debajo del límite (filtros buenos).

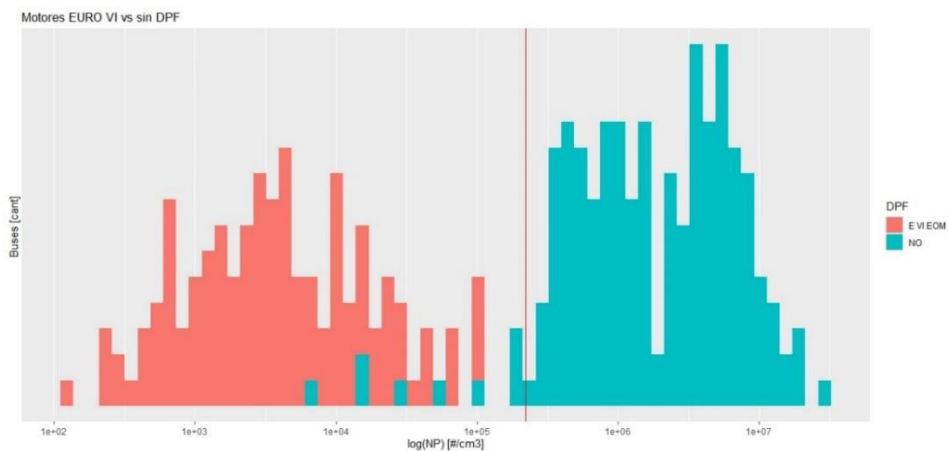
Un aspecto relevante en la magnitud de la población que se encuentra por sobre el límite, es la antigüedad del DPF. A continuación, se presenta la distribución de los buses con DPF en función de la edad del DPF. Aquí es posible observar como la proporción de buses por sobre el límite aumenta con los años de uso.

Ilustración 8: Histograma de la distribución de buses con DPF por años de uso, en relación con el límite de NP propuesto.



Por último, reuniendo las mediciones de los buses EURO VI, como una flota con filtros de partículas de muy poco o ningún deterioro, con los buses EURO V y EURO III sin DPF¹⁰, es posible comparar ambas flotas en relación con el límite propuesto. El gráfico a continuación muestra una línea vertical de color rojo que representa el límite de 250.000 [p/cm³] propuesto. Esto muestra que el límite propuesto permite separar adecuadamente entre buses con un DPF en perfectas condiciones de aquellos con emisiones sin DPF o DPF con fallas.

Ilustración 9: Histograma de la distribución de buses con DPF por años de uso, en relación con el límite de NP propuesto.

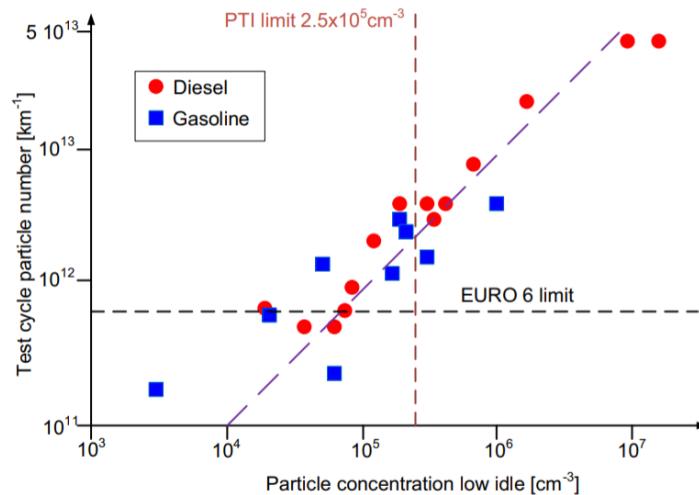


¹⁰ No existe diferencia significativa en las emisiones de NP para motores EURO V y EURO III, salvo las que se dan por la antigüedad del bus (ver gráficos Anexo 1).

Antecedentes internacionales para el procedimiento y límite propuesto

Otras aproximaciones para la definición del límite fueron desarrolladas en el paper [BURTSCHER 2019], en ellas se establece como recomendación un límite de NP de 250000 [p/cm³]. Entre ellas se utilizaron los valores de emisión de la homologación para vehículos livianos EURO VI, los cuales deben cumplir con un límite de $6 \cdot 10^{11}$ [p/km]¹¹ en el test de emisiones. Aplicando la medición en ralentí, y un límite de 250000 [p/cm³], todos los vehículos que sobrepasan este límite también sobrepasan el límite para la homologación.

Ilustración 10: Regresión valores NP del ciclo de homologación vs ralentí



Fuente: [BURTSCHER 2019]

Lo sorprendente de este resultado es como la simple prueba de ralentí puede correlacionar con las mediciones en laboratorio y como el límite de 250000 [p/cm³], se ajusta al límite de la homologación.

Finalmente hay que decir que las regulaciones en Países Bajos y en Suiza apuntan al valor de 250000 [p/cm³], muy cercano a los 220000 [p/cm³] recomendado por [GEASUR 2015] por lo que es el límite que se propone para la norma en Chile.

Por último, la medición de NP en ralentí demuestra ser una prueba más sencilla y rápida, que la de aceleración libre, actualmente en uso en Chile, y que además cuenta con la suficiente sensibilidad y correlación con pruebas dinámicas, como para detectar los DPF con fallas.

¹¹ Este valor se obtiene de la medición de NP durante un ciclo de conducción estandarizado, dividiendo el total de partículas por el largo en kilómetros del ciclo.

4. MODELACIÓN DE LAS EMISIONES

Como parte de la metodología se estimarán las emisiones de la flota RED, en MP2.5¹², con y sin proyecto de norma, a un horizonte de diez años (2023-2032). Para ello se considerarán las mediciones de NP en los gases de escape de los buses con DPF, como una medida indirecta de las emisiones de MP2.5, teniendo en cuenta la composición fisicoquímica de las partículas emitidas por un motor diésel, los factores de emisión COPERT para esta tecnología y la eficiencia de retención de un DPF.

4.1. AJUSTE A UN MODELO DE REGRESIÓN LINEAL

La base de información disponible para el desarrollo del presente estudio consiste en 600 observaciones en 36 variables, cuya estructura se detalla en Anexo 1.

De todas las variables disponibles se consideraron como relevantes las siguientes:

Tabla 5: Descripción variables relevantes mediciones NP

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
AÑO_BUS	Año fabricación del bus.
AÑO_DPF	Año fabricación e instalación del DPF. Para el caso de buses con DPF de fábrica corresponde al AÑO_BUS.
PROMEDIO_RAL	Resultado final de la medición de NP en ralentí.
EURO	Toma los valores EURO III, EURO III F (EURO III con DPF), EURO V y EURO VI.
DPF	Toma los valores NO (sin DPF), E III FAB (DPF de fábrica en bus EURO III), E III RET (EURO III usado reacondicionado con DPF) y E VI EOM (EURO VI con DPF original de fábrica).
AÑO_MED	Año de la medición y registro de los datos del bus (2015 o 2020)
EDAD_BUS	Años de uso entre el AÑO_BUS y AÑO_MED.
EDAD_DPF	Años de uso del DPF entre el AÑO_DPF y AÑO_MED.

Como se ha observado en los gráficos anteriores, debido a la gran diferencia de escala entre los resultados con y sin DPF se ha optado por usar escala log10 para la variable “y”, que representa los resultados medidos en NP (PROMEDIO_RAL).

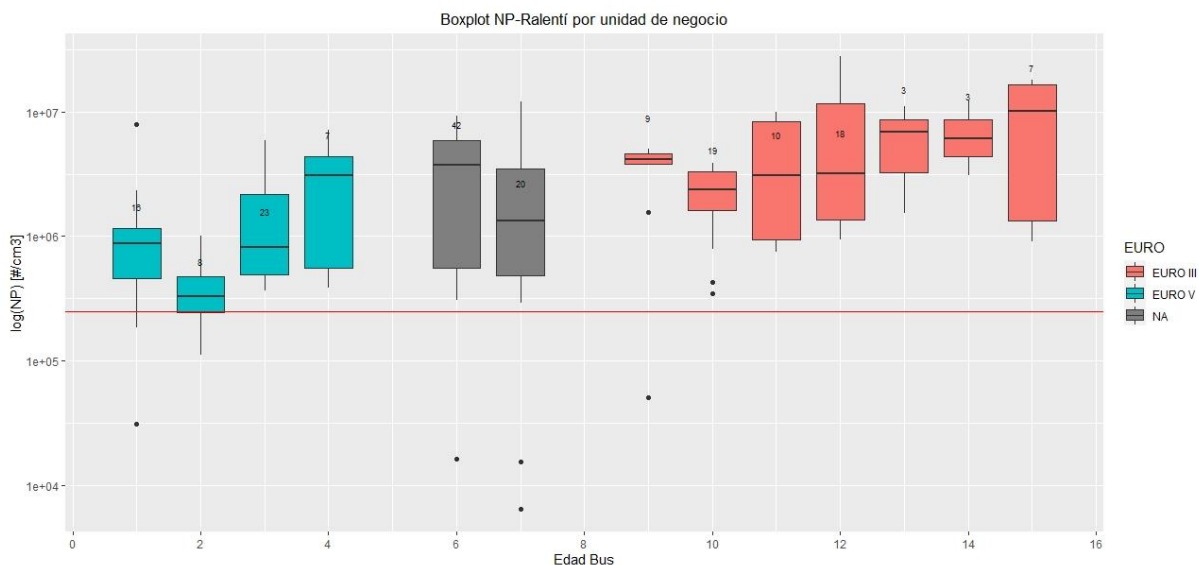
¹² Como señalado en los alcances del estudio, el contaminante a evaluar corresponde al MP2.5. Lo anterior considerando que, si bien el contaminante regulado es NP, éste no cuenta con valores epidemiológicos en Chile que permitan la aplicación de un análisis costo-beneficio.

Hipótesis para la modelación de las emisiones de la flota con DPF

- Como primera hipótesis para desarrollar el modelo de las emisiones de la flota sin DPF se ha considerado que las emisiones en NP (PROMEDIO_RAL) no dependen sustancialmente del nivel normativo (EURO III a EURO V) y que constituyen todos ellos una misma población.

Para corroborar esta hipótesis es necesario eliminar el efecto de la edad del motor, dado que, al comparar las emisiones de los buses por nivel normativo, desde EURO III a EURO V, estamos también comparando buses más antiguos con buses más nuevos, producto del calendario de entrada en vigencia de estas normas. Es decir, buses EURO V, son más nuevos que los EURO III. Por otro lado, para analizar las emisiones de los motores, sin el efecto del DPF se deben considerar sólo los buses sin DPF (EURO III y EURO V). En el gráfico que se presenta a continuación se observa el efecto de la edad del bus y el nivel normativo para los motores EURO III y EURO V (sin DPF). Estos gráficos del tipo Box Plot (o cajón con bigotes) permiten mostrar en los bordes superior e inferior de la caja, el percentil 25% y 75% respectivamente, en la línea central el valor de la mediana y los valores extremos quedan representados por las líneas que sobresalen (bigotes). Los valores atípicos o "outlier" se representan como puntos alejados de la distribución.

Ilustración 11: Gráfico cajón con bigotes para la distribución de valores de NP por nivel edad del bus y nivel normativo (en colores). Color gris (leyenda NA), representa sobre posición de flotas EURO III y EURO V, para los buses de 6 y 7 años de antigüedad.



En el gráfico anterior se sobreponen ambos efectos, edad y norma de emisiones. Es así como, una comparación que agrupe todos los EURO III, por una parte, y todos los EURO V,

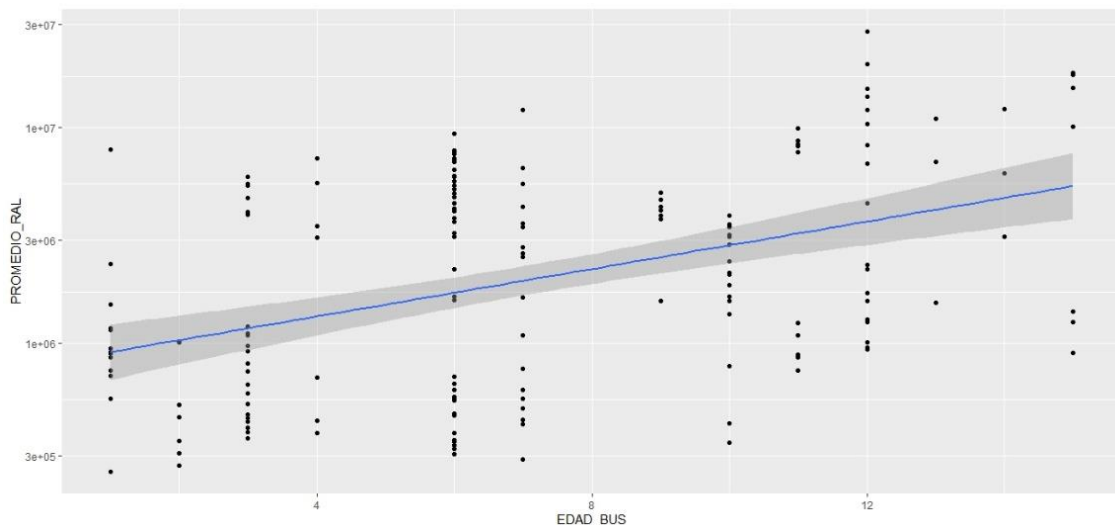
por la otra, nos muestra que existe una diferencia significativa entre ambos niveles normativos (Ver ANEXO A1.6).

No obstante, si comparamos los valores de NP, descartando las edades más extremas en cada nivel normativo y dejando el rango 4 a 12 años, se observa, bajo el mismo test estadístico, que no existen diferencias significativas (ver ANEXO A1.7). Por lo tanto, se asume que las diferencias de emisiones de NP entre EURO III y EURO V, obedecen al efecto de la edad y no de la norma de emisiones,

- b. Como segunda hipótesis se ha considerado que las emisiones del motor dependen de la edad del bus (EDAD_BUS). Esto es que las emisiones de NP del motor, independiente del nivel normativo, se deterioran con el tiempo.

Ya se observaba en el caso anterior que la edad tenía un efecto en las emisiones de los buses sin DPF. A continuación, ajustaremos una regresión lineal entre ambas variables (edad y emisiones de NP), del tipo: $\log_{10}(y) = \beta_1 * (x) + \beta_2$

Ilustración 12: Regresión y rango de error para NP (PROMEDIO_RAL) vs edad del bus (EDAD_BUS) sin DPF



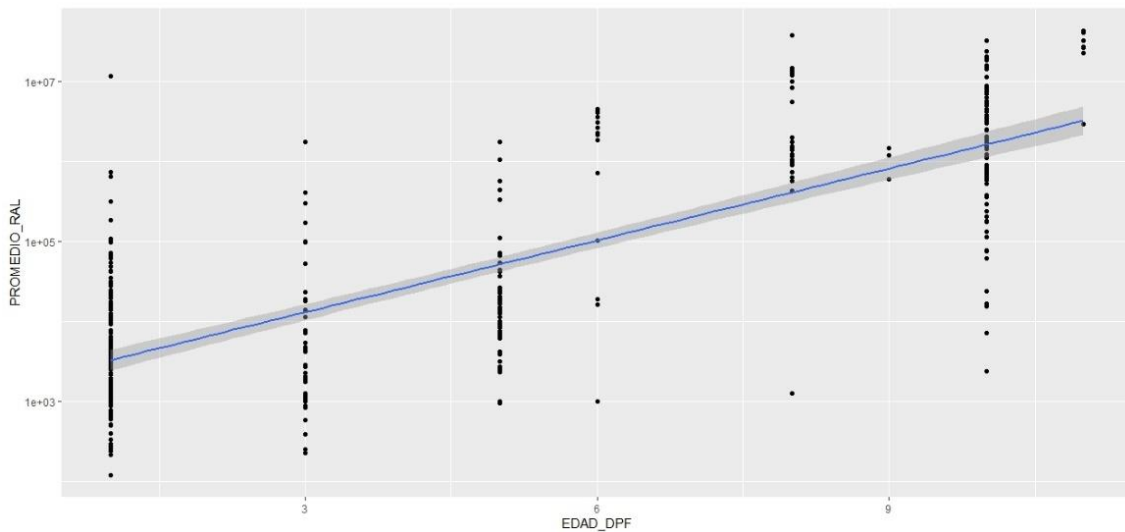
Para discutir la bondad del ajuste, se muestra en ANEXO A1.9 el sumario estadístico del modelo lineal.

Si bien R^2 es bajo (0.18), por lo que la edad del motor explicaría sólo una parte de la variación de las emisiones, el valor de los estadísticos reportado (p-value del estadístico F), refleja que la edad sí tiene efecto en las emisiones.

- c. Como tercera hipótesis se ha considerado que las emisiones a la salida del DPF dependen de la edad del filtro (EDAD_DPF)¹³. Esto es que la eficiencia del DPF se deteriora con el tiempo, impactando en las emisiones medidas de NP.

A continuación, ajustaremos una regresión lineal del tipo: $\log_{10}(y) = \beta_1 * (x) + \beta_2$

Ilustración 13: Regresión y rango de error para la media NP vs EDAD_BUS con DPF



Para discutir la bondad del ajuste se muestra en ANEXO A1.10 el sumario estadístico del modelo lineal.

Para este caso R^2 , es bastante mayor, explicando la edad del DPF buena parte de la variación de las emisiones.

4.2. ESTIMACIÓN LAS TASAS DE RECHAZO

Hasta ahora contamos con la modelación, por regresión lineal, de las emisiones de NP para el motor sin y con DPF, como función de la edad del motor o del DPF, respectivamente. Por lo tanto, podemos simular o predecir el comportamiento de las emisiones de NP antes y después del DPF como función de la edad del motor. En consecuencia, podemos modelar también la eficiencia promedio de la flota en función de la edad del bus, de la siguiente manera:

¹³ También entonces de la EDAD_BUS, pero no de manera independiente.

$$\text{Ecuación 1: } Ef_i = \frac{(NP_{mot,i} - NP_{DPF,i})}{NP_{mot,i}}$$

Donde:

- Ef_i : Eficiencia promedio del DPF, para la edad i de la flota en años.
- $NP_{mot,i}$: Emisiones NP del motor, predichas por el modelo lineal obtenido de la flota sin DPF, para la edad i de la flota.
- $NP_{DPF,i}$: Emisiones NP después del DPF, predichas por el modelo lineal obtenido de la flota medida con DPF, para la edad i de la flota.

Utilizando los valores predichos por las regresiones ajustadas para predecir los valores de NP con y sin DPF, se calcula a continuación la eficiencia promedio de los filtros de la flota y las tasas de rechazo, como función de la edad del bus.

En la Ilustración 14 se muestra una comparación entre las tasas de rechazo modeladas con las de la muestra:

Ilustración 14: Comparación tasas de rechazo modeladas vs de la muestra. Puntos en rojo indican muestras $n < 30$

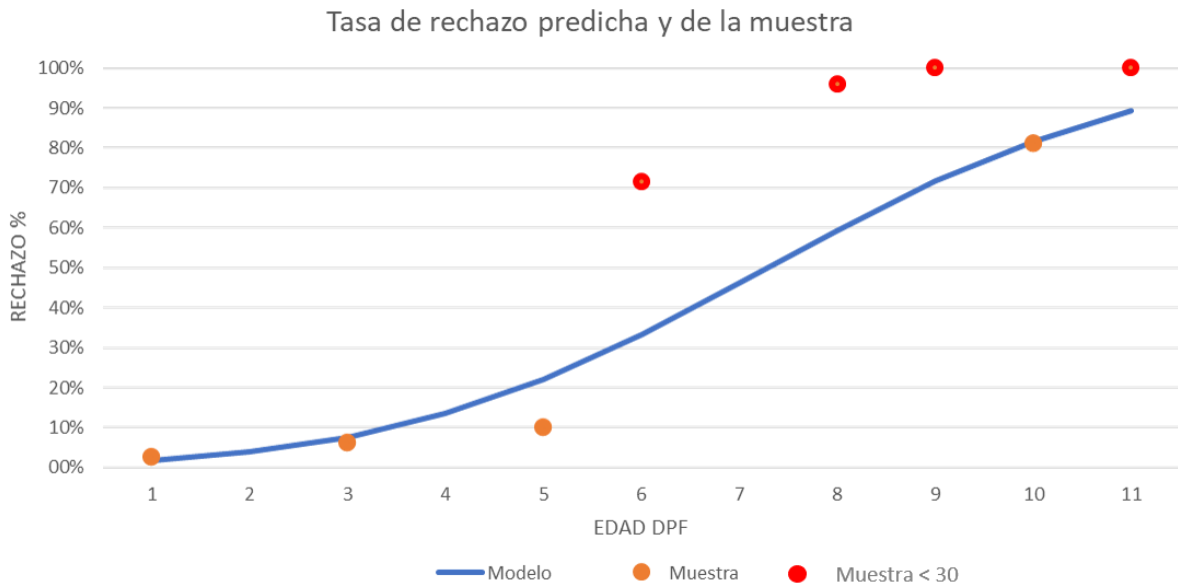


Tabla 6: Predicciones del modelo de regresión lineal para las emisiones de NP y tasas de rechazo, como función de la edad (para las muestras sin DPF se obtiene una desviación estándar de 0.56 de LOG(NP), y para las muestras con DPF, una desviación estándar de 0.89 LOG(NP)). En rojo porcentaje de rechazo de muestras $n < 30$.

	Sin DPF	Con DPF					
Edad bus	Emisiones NP Modeladas	Emisiones NP Modeladas	Eficiencia DPF Modelada	Rechazo modelado (NP>250.000)	MUESTRA		
[años]	[p/cm ³]	[p/cm ³]	%	%	N MUESTRA	NP > 250000	% RECHAZO
1	691.830,97	3.235,94	99.5%	1.8%	142	4	3%
2	794.328,23	6.456,54	99.2%	3.8%			
3	912.010,84	12.882,50	98.6%	7.5%	47	3	6%
4	1.071.519,31	25.703,96	97.6%	13.5%			
5	1.230.268,77	51.286,14	95.8%	22.1%	50	5	10%
6	1.445.439,77	102.329,30	92.8%	33.2%	14	10	71%
7	1.659.586,91	204.173,79	87.7%	46.1%			
8	1.905.460,72	407.380,28	78.8%	59.4%	24	23	96%
9	2.238.721,14	812.830,52	63.6%	71.6%	3	3	100%
10	2.570.395,78	1.621.810,10	37.3%	81.8%	85	69	81%
11	3.019.951,72	3.235.936,57	0%	89.3%	7	7	100%
12	3.467.368,50	NA	NA	NA	NA	NA	NA
13	3.981.071,71	NA	NA	NA	NA	NA	NA
14	4.677.351,41	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15	5.370.317,96	NA	NA	NA	NA	NA	NA
16	6.165.950,02	NA	NA	NA	NA	NA	NA

4.3. ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN

Para la estimación de emisiones de la flota en MP2.5, con y sin proyecto de norma, se propone el uso de la metodología MODEM (para más detalles ver [MODEM 2010]¹⁴), en particular la metodología para el cálculo de emisiones en caliente por el tubo de escape (metodología de arco). En esta, se utiliza la modelación ESTRAUS de transporte, sobre los arcos de la red vial de Santiago, para la definición de las velocidades medias y los flujos vehiculares, que sirven al cálculo de los factores de emisión y del nivel de actividad, respectivamente.

$$\text{Ecuación 2: } E_{hijk} = F_j \cdot L_{hj} \cdot fe(v_{hj})_{ik} \cdot PF_{hjk} \cdot C_{jk}$$

E_{hijk}	:	Emisiones [gr] del contaminante i en un arco j para la categoría vehicular k en una hora determinada h del día.
F_j	:	Flujo vehicular total en [veh/h] para el arco j , a la hora en que se establecieron los parámetros por arco del modelo de transportes utilizado como base (Ejemplo Punta Mañana).
L_j	:	Largo del arco j .
$fe(v_{hj})_{ik}$:	Factor de emisión del contaminante i en [gr/km], para la categoría vehicular k , en función de la velocidad media en el arco j a la misma hora h del día.
v_{hj}	:	Velocidad media del flujo en el arco j a la hora h del día.
PF_{hjk}	:	Perfil de flujo o fracción del flujo total F_j del arco j , correspondiente a la hora determinada h y sector asociado al arco.
C_{jk}	:	Composición o fracción del flujo total F_j del arco j que corresponde a la categoría vehicular k

Para simular los escenarios de transporte entre 2020 y 2032, se utilizará la modelación de transporte 2019, la más reciente disponible que forma parte del seguimiento anual de las emisiones de RED (artículo 6 del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana).

Para modelar la situación con y sin proyecto de norma, se considerará que las emisiones de MP2.5 del tubo de escape de un motor diésel consisten en una parte de Carbono Elemental (EC) y otra de Material Orgánico (OM). Una relación entre ambos, para las distintas tecnologías, se encuentra en [COPERT 2013], la que se entrega en la Tabla 7. A su vez, si consideramos que los valores de eficiencia para los DPF de la flota han sido modelados a partir de mediciones sobre la fracción sólida, como se explica en el punto 1.1. de este informe, es que consideraremos, como condición conservadora para la estimación de los impactos, que la eficiencia del DPF actúa solamente sobre dicha fracción, ya que se desconoce en qué porcentaje el DPF pudo retener la fracción soluble.

¹⁴ <http://www.sectra.gob.cl/metodologias/modem.htm>

COPERT proporciona una tabla con la fracción de hollín (BC), presente en el MP2.5, la que se utilizará para estimar un factor de emisión corregido por la eficiencia del DPF.

Tabla 7: Fracción de carbono elemental en las emisiones de motores pesados.

CATEGORÍA	NORMA	MP2.5/BC % - Rango
VEHÍCULOS PESADOS Y BUSES URBANOS	Convencional	40-60
	EURO I	52-78
	EURO II	52-78
	EURO III	56-84
	EURO IV	60-90
	EURO V	60-90
	EURO VI	9,5-19,5

Emisiones MP2.5 para flota EURO VI

El modelo de emisiones MODEM, utiliza el factor de emisión COPERT, para la masa del MP2.5, (fe^{COP}), como una función de la velocidad. El objetivo de esta parte del estudio es generar factores de emisión en masa modelados para el MP2.5, para la flota EURO VI, que consideren el deterioro de los DPF como función de la edad i de la flota ($fe_{VI,i}^{Mod}$). Para esto se asume que en el año $i = 1$, la eficiencia del DPF es la obtenida en la Tabla 6 ($Ef_1 = 0,995$), que corresponde a la condición de filtro nuevo y que el DPF actúa sólo sobre la fracción sólida (EC), con lo que se obtiene la siguiente expresión para el factor de emisión en masa del EC del motor y antes del DPF (ver desarrollo de la ecuación en Anexo A1.10):

$$\text{Ecuación 3: } fe_{VI,1}^{CE,MOT} = 30 * fe_{VI}^{COP}$$

Para $i = 1$ a 11:

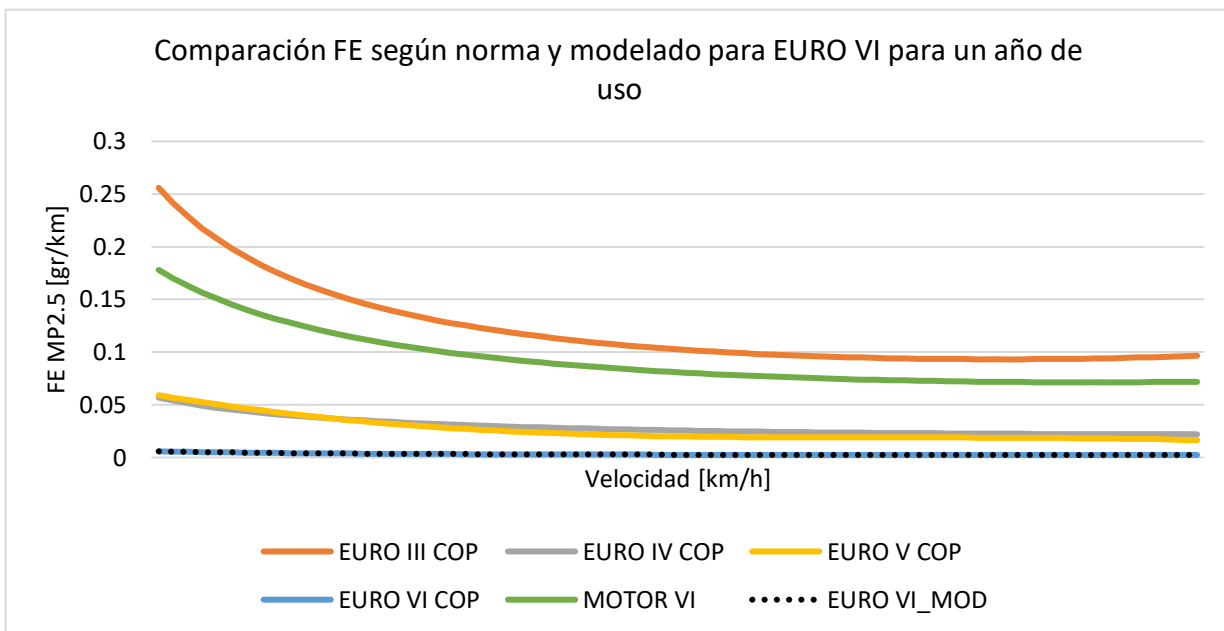
$$\text{Ecuación 4: } fe_{VI,i}^{CE,MOD} = 30 * (1 - Ef_i) * fe_{VI}^{COP}$$

Lo anterior nos permite modelar las emisiones del bus EURO VI como función de los años de uso con la siguiente expresión, que considera ahora la fracción sólida y la orgánica:

$$\text{Ecuación 5: } fe_{VI,i}^{MOD} = 30 * (1 - Ef_i) * fe_{VI}^{COP} + 0.85 * fe_{VI}^{COP}$$

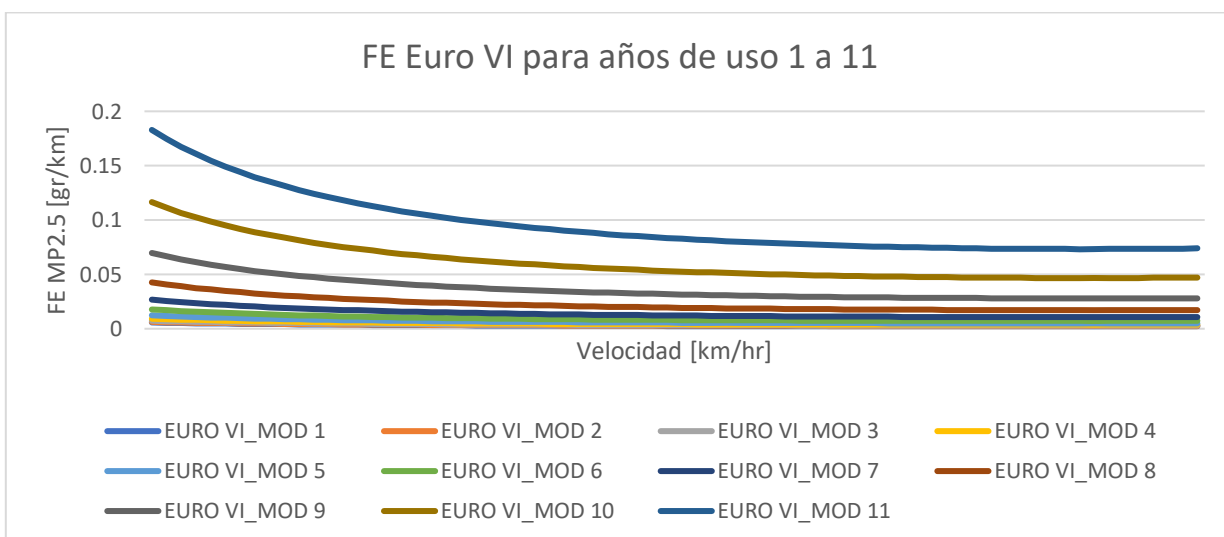
A continuación, se presenta una comparación gráfica entre distintos factores de emisión COPERT y el valor estimado para el modelo con deterioro del DPF.

Ilustración 15: Comparación FE de MP2.5 según norma y EURO VI modelado para un año de uso.



Como se observa en el gráfico anterior los valores modelados, para un año de uso, coincide con los valores de COPERT. Respecto de las emisiones antes del DPF, en este caso se obtienen emisiones entre EURO V y EURO III.

Ilustración 16: FE EURO VI para años de uso 1 a 11



Emisiones MP2.5 para flota EURO III con DPF

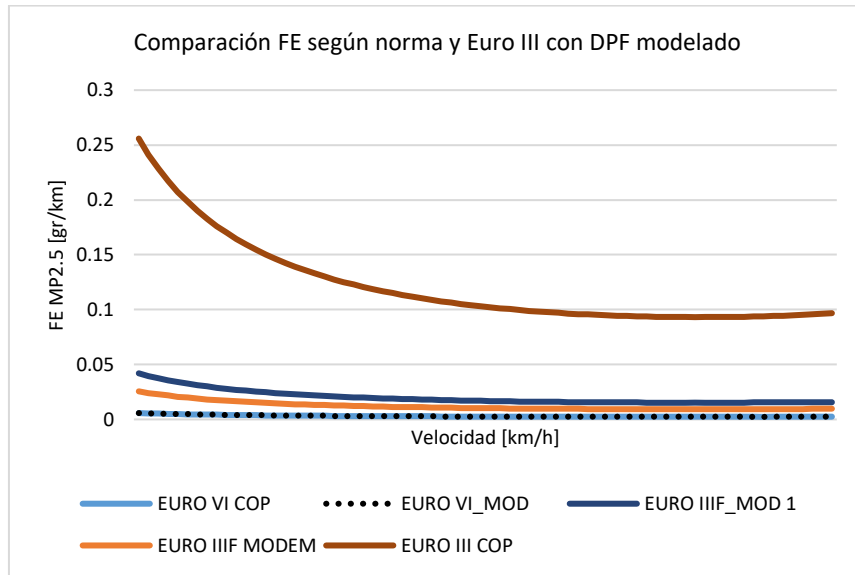
Corresponde a la flota EURO III con filtro de fábrica o reacondicionado. En este caso, utilizando el rango superior para la estimación de la fracción sólida para un motor EURO VI de la Tabla 7, podemos expresar el factor de emisión de la fracción sólida en el motor como:

$$\text{Ecuación 6: } fe_{III}^{CE,Mot} = 0.84 * fe_{III}^{COP}$$

Considerando la eficiencia del DPF como función de la edad i del bus, podemos expresar el factor de emisión modelado para la flota EURO III F como:

$$\text{Ecuación 7: } fe_{III F,i}^{MOD} = (1 - Ef_i) * 0.84 * fe_{III}^{COP} + 0.16 * fe_{III}^{COP}$$

Ilustración 17: Comparación FE según norma y EURO III con DPF modelado



Emisiones MP2.5 con proyecto

Para modelar las emisiones con proyecto de norma se asumirá que la fiscalización en PRT y vía pública permiten, en el transcurso de 1 año, la detección y posterior reparación de todos los DPF con desperfectos, llevando la correcta reparación de los mismos a su condición de máxima eficiencia, con lo que se mantienen los factores de emisión correspondientes a $i = 1$, para todos los buses de la flota k (EURO VI y EURO III con DPF).

$$\text{Ecuación 8: } fe_{k,i}^{MOD} = fe_{k,1}^{MOD}$$

4.4. CÁLCULO DE EMISIONES

Cálculo del Nivel de Actividad

Para el cálculo de emisiones se utilizará la metodología MODEM para emisiones de escape, que considera los resultados del modelo de transporte ESTRAUS. Este modelo entrega un archivo denominado entrada emisiones que representa 18.606 arcos viales de la red vial de la Región Metropolitana para el año 2019, y que cuenta con información del flujo vehicular y las velocidades, para la hora punta mañana (*EE_EMISIONES_AM*). A partir de esta información este consultor elaboró un modelo simplificado siguiendo la misma lógica de MODEM. Esto es que calcula primero el nivel de actividad (NA) en [km], de todo el flujo que circula en cada uno de los 18.606 arcos. Este nivel de actividad (NA_AM), da cuenta sólo del nivel de actividad en hora punta (AM), por lo que se expande a las horas del día y días de la semana multiplicando por matrices de ponderación denominadas de perfil horario (PH). Finalmente, para llevar el NA a un total anual se utiliza el perfil mensual (PM), que pondera el NA para cada uno de los meses del año. Los PH como PM usados corresponden a los utilizados por MODEM. Para el caso del estudio se han considerados sólo los flujos de buses de RED, los que vienen desagregados por tipo de flota, según categorías MODEM (CCF6) como se muestra a continuación:

Tabla 8: Comparación de resultados del NA entre el modelo simplificado y MODEM para las categorías de la flota definidas por MODEM. [MM Km/año]

LEYENDA	TIPO FLOTA	MODEM	MODELO SIMPLIFICADO	% DIFERENCIA
75AB	Buses Alimentadora B	1,18	1,23	-4%
75AC	Buses Alimentadora C	0,73	0,76	-4%
75AD	Buses Alimentadora D	1,42	1,37	4%
75AE	Buses Alimentadora E	0,57	0,59	-2%
75AF	Buses Alimentadora F	2,08	2,15	-3%
75AG	Buses Alimentadora G	1,90	2,21	-17%
75AH	Buses Alimentadora H	0,30	0,30	0%
75AI	Buses Alimentadora I	1,08	1,08	0%
75AJ	Buses Alimentadora J	1,15	1,48	-29%
160T2	Buses Troncal 2 Articulados	0,84	0,84	0%
90T2	Buses Troncal 2 Rígidos	3,17	3,35	-6%
90T3	Buses Troncal 3 Rígidos	1,65	1,69	-2%
160T4	Buses Troncal 4 Articulados	6,77	4,89	28%
90T4	Buses Troncal 4 Rígidos	4,18	3,53	15%
160T5	Buses Troncal 5 Articulados	5,73	5,64	2%
90T5	Buses Troncal 5 Rígidos	3,45	3,21	7%
TOTALES		36,20	34,34	5%

Las diferencias pueden corresponder a que el modelo simplificado hace algunas generalizaciones respecto de los perfiles horarios. Esto es que MODEM detalla perfiles horarios distintos por zona, mientras que se ha considerado una situación promedio para todo Santiago en el caso del modelo simplificado. Esto puede afectar el nivel de actividad de algunos servicios como los vistos en el cuadro anterior.

Cálculo del factor de emisión

El factor de emisión de MP2.5, para los buses con DPF (EURO III+DPF y EURO VI), se calcula a partir de las expresiones obtenidas en Ecuación 5 y Ecuación 7, como una función del factor COPERT para EURO VI y EURO III, utilizado por MODEM, considerando la velocidad del flujo en la RED y la eficiencia del DPF. Esta última depende del deterioro por año de uso o edad del DPF, según la eficiencia modelada de la Tabla 6.

Se considera para la velocidad de cada arco un valor intermedio entre la velocidad en punta mañana (AM) y la de flujo libre para modelar el comportamiento a las diferentes horas del día. Para cada uno de los tipos de flota considerados y sus composiciones tecnológicas, se define el factor de emisión en función de la velocidad entregada por MODEM y la antigüedad calculada a partir del consolidado de la flota RED disponible por la SEREMI de Transportes de la RM del año 2019 (FLOTA_RED_2019).

Tabla 9: Modelación del FE para cada tipo de flota y tecnología año 2019.

TIPO_TECNOLOGÍA	FE	EDAD_DPF_F	EFIC
160_EURO_3	MODEM (COPERT IV)	14	NA
160_EURO_3_DPF	$fe_{III,F,i}^{MOD} = ((1 - Ef_i) * 0.84 + 0.16) * fe_{III}^{COP}$	13	0
160_EURO_6	$fe_{VI,i}^{MOD} = (30 * (1 - Ef_i) + 0.85) * fe_{VI}^{COP}$	1	0,995
75_90_EURO_3	MODEM (COPERT IV)	12	NA
75_90_EURO_3_DPF	$fe_{III,F,i}^{MOD} = ((1 - Ef_i) * 0.84 + 0.16) * fe_{III}^{COP}$	9	0,636
75_90_EURO_5	MODEM (COPERT IV)	6	NA
75_90_EURO_6	$fe_{VI,i}^{MOD} = (30 * (1 - Ef_i) + 0.85) * fe_{VI}^{COP}$	1	0,995
ELECTRICO	NA	1	NA

Resultado del modelo simple v/s MODEM 2019

A diferencia de MODEM, el modelo simple cuenta con las siguientes ventajas para el caso del estudio:

- Está programado en lenguaje R gratuito y universalmente disponible, lo que permite las adaptaciones necesarias para los requerimientos específicos del estudio (Ejemplo: incorporar eficiencia del DPF en función de la antigüedad de la flota).
- MODEM está destinado a entregar resultados detallados por arco y para una gran cantidad de flotas diferentes, lo que lo hace lento para los propósitos del estudio, pudiendo demorar varias horas en una corrida v/s menos de un minuto para el modelo

simple. En particular, para la modelación de 10 años, en al menos dos escenarios (con y sin proyecto de norma) se requerirían 60 horas de procesamiento computacional.

Respecto de los resultados obtenidos con el modelo simple vs MODEM, para el año 2019, se entrega a continuación una comparación.

Tabla 10: Comparación resultados MODEM vs Modelo Simple.

FLOTA	MODEM	SIMPLE	DIFERENCIA
EMI_160T2	0,84	0,84	0%
EMI_160T4	6,77	4,89	28%
EMI_160T5	5,73	5,64	2%
EMI_75AB	1,18	1,23	-4%
EMI_75AC	0,73	0,76	-4%
EMI_75AD	1,42	1,37	4%
EMI_75AE	0,57	0,59	-2%
EMI_75AF	2,08	2,15	-3%
EMI_75AG	1,90	2,21	-17%
EMI_75ah	0,30	0,30	0%
EMI_75AI	1,08	1,08	0%
EMI_75AJ	1,15	1,48	-29%
EMI_90T2	3,17	3,35	-6%
EMI_90T3	1,65	1,69	-2%
EMI_90T4	4,18	3,53	15%
EMI_90T5	3,45	3,21	7%
TOTALES	22,86447747	22,9629789	0%

Ilustración 18: Comparación FE según norma y EURO III con DPF modelado

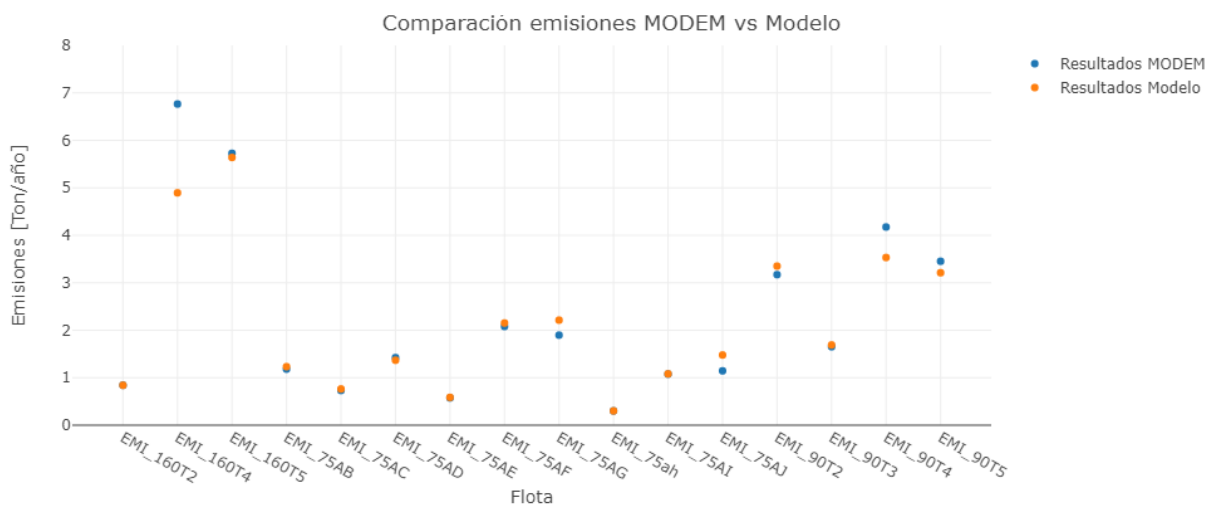
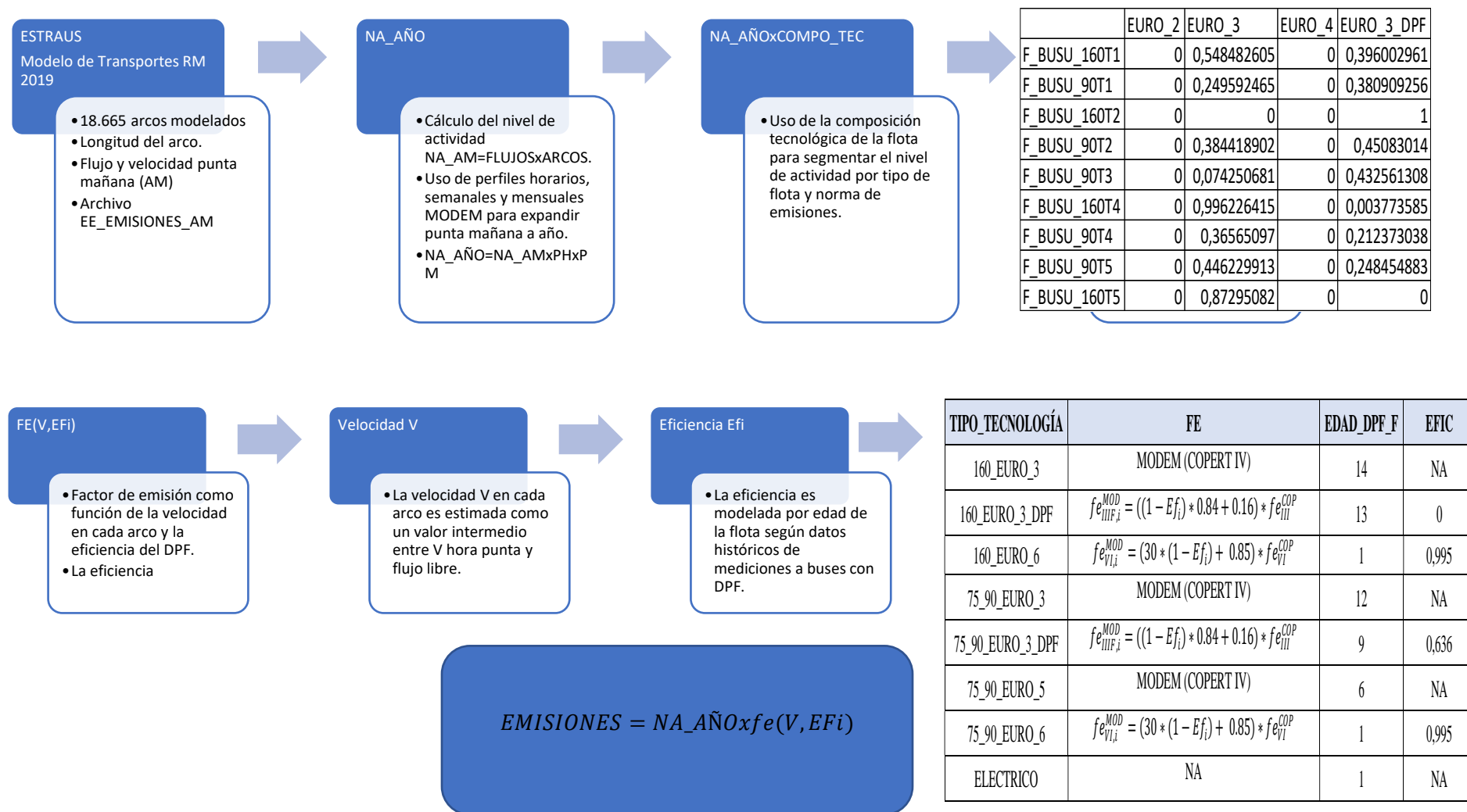


Ilustración 19: Comparación FE según norma y EURO III con DPF modelado

NA_AÑO: Nivel de actividad en kilómetros-año.

Fe(V,Efi): Factor de emisión de MP2.5 en gr/km. Como función de la velocidad media en el arco y la eficiencia del DPF.



Proyección de las emisiones

Para generar la proyección de escenarios entre 2023 y 2032, se requiere proyectar la composición tecnológica y el deterioro del DPF a partir de los datos 2019 del modelo simple. Esto se hace modificando la composición tecnológica de la flota (COMPO_TEC), conforme el programa de retiros e ingreso de buses nuevos, según sus tecnologías.

La proyección de la composición tecnológica de la flota se simuló a partir de la composición tecnológica de la corrida MODEM disponible para el año 2019. Esta se modificó considerando un programa de retiro e ingreso de buses discutido con la contraparte, de la forma siguiente:

Tabla 11: Criterios de retiro e ingreso de buses en la flota RED.

AÑO	RETIRO DE BUSES	INGRESO DE BUSES
2020	1.160 BUSES	<ul style="list-style-type: none">• 365 ELÉCTRICOS• 795 EURO VI
2021	2.000 BUSES	<ul style="list-style-type: none">• 400 ELÉCTRICOS• 1600 EURO VI
2022-2032	BUSES DIÉSEL > 10 AÑOS DE ANTIGUEDAD	<ul style="list-style-type: none">• 30% ELÉCTRICOS• 70% EURO VI

Dado que no se conocen con detalle todos los criterios que en el futuro regularán el proceso de retiro e ingreso, se debió hacer los siguientes supuestos adicionales:

- El total de buses de la flota permanece constante en el horizonte del proyecto.
- Dado lo anterior, los buses diésel que se retiran son igual en cantidad a los que ingresan, empezando por retirar siempre los más antiguos en edad y tecnología.

A continuación, se muestra la representación de los criterios anteriores, en la tabla de entrada utilizada en el cálculo de flotas proyectadas, desarrollada por el consultor en hojas de cálculo Excel y que se entrega adjunta a este informe como parte de los productos de la consultoría.

Tabla 12: Criterios de retiro e ingreso de buses en la flota RED.

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
ANTIGÜEDAD MÁXIMA DIÉSEL (5 a 15 AÑOS)	99	99	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ANTIGÜEDAD MÁXIMA BUSES ELÉCTRICOS (SIN MÁXIMO)	99	99	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
CÁLCULO RETIROS DIÉSEL POR ANTIGÜEDAD	0	0	1981	220	519	7	183	151	2	663	784	1392	1380
RETIROS DIÉSEL ADICIONALES PLANIFICADOS	1160	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CÁLCULO TOTAL RETIROS DIÉSEL	1160	2000	1981	220	519	7	183	151	2	663	784	1392	1380
% ELÉCTRICO EN FLOTA NUEVA	NA	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
CÁLCULO % EURO_6 EN FLOTA NUEVA	NA	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
CÁLCULO CANTIDAD BUSES ELÉCTRICOS NUEVOS	365	600	594	66	156	2	55	45	1	199	235	418	414
CÁLCULO CANTIDAD BUSES EURO_6 NUEVOS	795	1400	1387	154	363	5	128	106	1	464	549	974	966

Nota:

	Valores modificables en planilla Excel
	Valores fijos en planilla Excel
	Resultados de la planilla Excel
	Título de la tabla Excel

De la tabla anterior, las celdas en verde representan los valores ingresados por el usuario, y las azules el resultado de los cálculos para la flota desde el año 2020 al 2032. Ingresando la antigüedad máxima permitida a la flota diésel, las hojas de cálculo generan la cantidad de retiros año por año. A estos se suman los retiros programados por la autoridad. Por ejemplo, para los años 2020 y 2021, no se aplica criterio de antigüedad, sino que los retiros previstos por la autoridad, de 1160 y 2000 buses respectivamente. Estos retiros representan una cantidad igual de ingreso de buses a la flota, distribuida entre buses EURO VI y ELÉCTRICOS. La distribución se ingresa en la fila correspondiente de la Tabla como % Eléctrico y % EURO VI. Esta se ha considerado en valores de 30% y 70% respectivamente, constante para todos los años, considerando lo programado por DTPM para el año 2021.

A partir de esta información el modelo de cálculo genera 12 tablas con la composición tecnológica (en tanto por uno), desde EURO III hasta buses ELÉCTRICOS, pasando por toda la gama de normas disponibles en la flota, para cada año de la simulación de emisiones considerada (2020 a 2032). Esta composición tecnológica es con detalle de cada tipo de flota disponible en MODEM, como se presenta a manera de ejemplo para el año 2022, utilizando la nomenclatura del modelo, para las troncales (T2 a T5) y las alimentadoras (B a J).

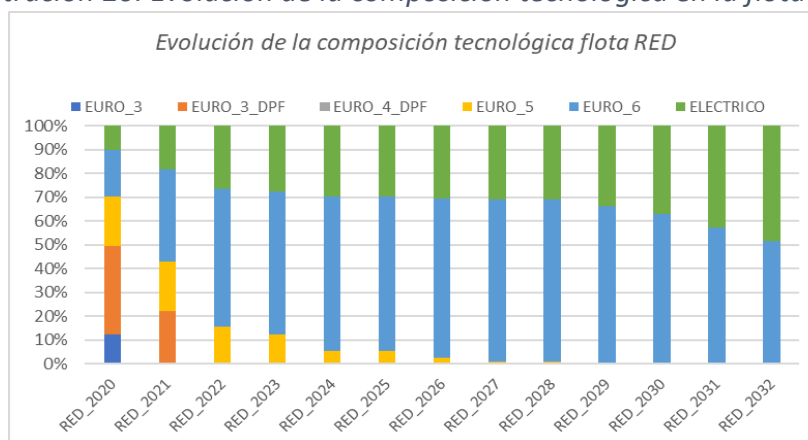
Tabla 13: Ejemplo de composición tecnológica modelada. Año 2022.

	EURO_2	EURO_3	EURO_4	EURO_3_DPF	EURO_4_DPF	EURO_5	EURO_6	HIBR	ELECT
F_BUSU_160T2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6985	0.0000	0.3015
F_BUSU_90T2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1491	0.5943	0.0000	0.2566
F_BUSU_90T3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3116	0.4111	0.0000	0.2773
F_BUSU_160T4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6986	0.0000	0.3014
F_BUSU_90T4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3070	0.4837	0.0000	0.2093
F_BUSU_160T5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7441	0.0000	0.2559
F_BUSU_90T5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2263	0.5401	0.0000	0.2336
F_BUSU_75AB	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0336	0.7369	0.0000	0.2295
F_BUSU_75AC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0397	0.7285	0.0000	0.2318
F_BUSU_75AD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3041	0.4885	0.0000	0.2074
F_BUSU_75AE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1057	0.4886	0.0000	0.4057
F_BUSU_75AF	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1077	0.7123	0.0000	0.1800
F_BUSU_75AG	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1243	0.5650	0.0000	0.3107
F_BUSU_75AH	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1316	0.4789	0.0000	0.3895
F_BUSU_75AI	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1128	0.5354	0.0000	0.3519
F_BUSU_75AJ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1390	0.6364	0.0000	0.2246

Como puede verse de la tabla anterior, con el programa de retiro previsto para 2020 y 2021, para el año 2022, la flota RED se distribuye sólo entre tecnologías EURO V, EURO VI y ELÉCTRICOS, desapareciendo los buses EURO III y EURO III con DPF.

A continuación, en la Ilustración 20, se representa la evolución de la composición tecnológica entre los años 2020 y 2032.

Ilustración 20: Evolución de la composición tecnológica en la flota RED.



Respecto de las emisiones, para el escenario sin proyecto se ha considerado el deterioro de los DPF, según el envejecimiento de la flota año tras año y el correspondiente valor de eficiencia conforme la edad promedio de la flota de la Tabla 6. Para el escenario con proyecto de norma se supone la eficiencia máxima para la flota (0.995).

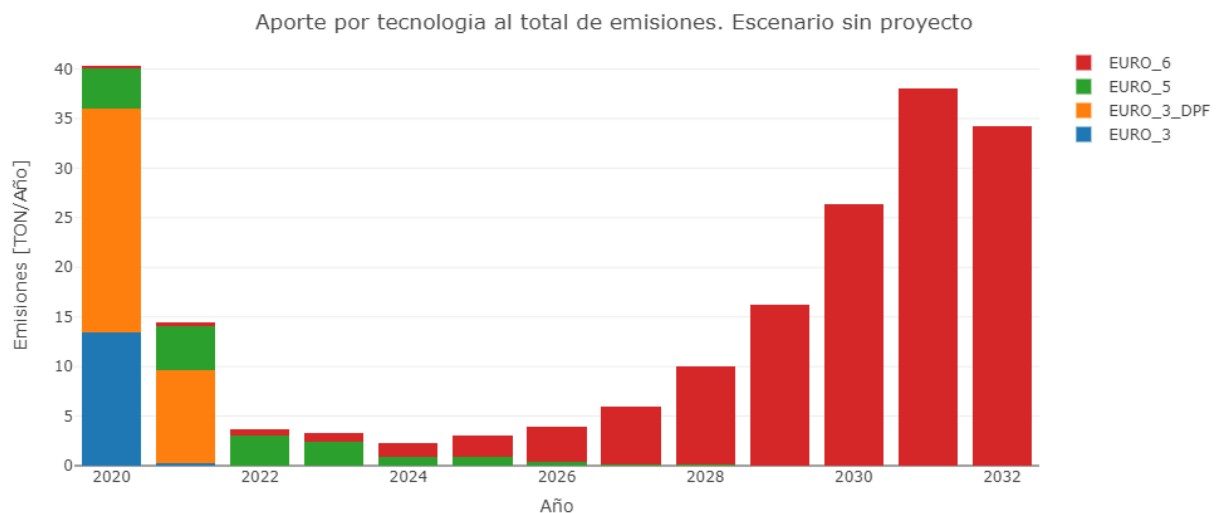
4.5. RESULTADOS

Escenario sin proyecto

A continuación, se presentan los resultados en emisiones de MP2.5 por tubo de escape, de la flota RED en el escenario sin proyecto (Línea Base), es decir en la evolución de las emisiones sin norma de NP en revisiones técnicas. Los cambios de las emisiones año a año obedecen a los siguientes factores:

- Cambio en la composición tecnológica producto de la renovación de buses.
- Deterioro de la eficiencia de los DPF conforme los datos históricos obtenidos de la medición de la flota con DPF (600 mediciones).

Ilustración 21: Emisiones de la flota RED, escenario sin proyecto – Línea Base



En este escenario se observa un fuerte impacto de deterioro en los buses EURO VI, lo que conforme los resultados de las mediciones históricas de la flota RED, obedece a la eficiencia cero de los filtros a los 11 años de uso (año 2031 para buses EURO VI del año 2020). Respecto de los EURO V, el modelo de emisiones sólo recogió el factor de emisión bibliográfico, es decir sin considerar efectos de deterioro posiblemente capturados en las mediciones, ya que no era el objetivo evaluar el desempeño de esta tecnología.

Los buses EURO III+DPF, presentan una alta contribución al comienzo, la que desaparece al año 2022 producto del retiro por antigüedad y reemplazo por buses eléctricos y EURO VI.

Los buses EURO III disminuyen a cero también su contribución al año 2022 producto del reemplazo por buses eléctricos y EURO VI.

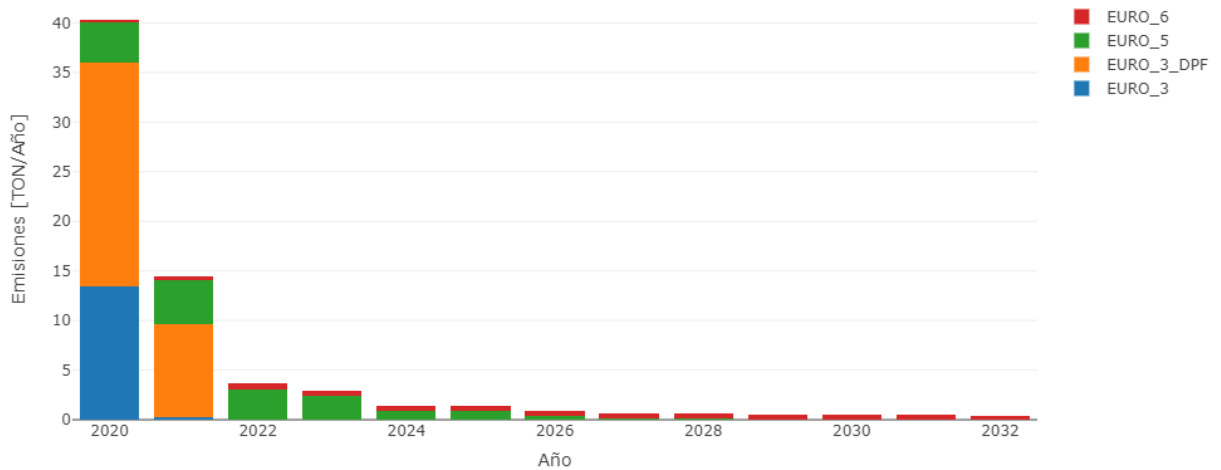
Escenario con proyecto

A continuación, se presentan los resultados del modelo simplificado en el escenario con proyecto de norma. Considerando la aplicación de la norma al año 2023, sólo es posible

aplicarla a los buses EURO VI, como único escenario posible, ya que los buses EURO III + DPF no están presentes más en la flota a partir del 2022.

Ilustración 22: Emisiones de la flota RED con proyecto

Aporte por tecnología al total de emisiones. Escenario con proyecto



En términos de emisiones de MP2.5 evitadas, por año evaluado, se presenta a continuación un gráfico y la tabla respectiva.

Ilustración 23: Emisiones MP2.5 evitadas con proyecto.

Emisiones totales MP 2.5 ahorradas con proyecto

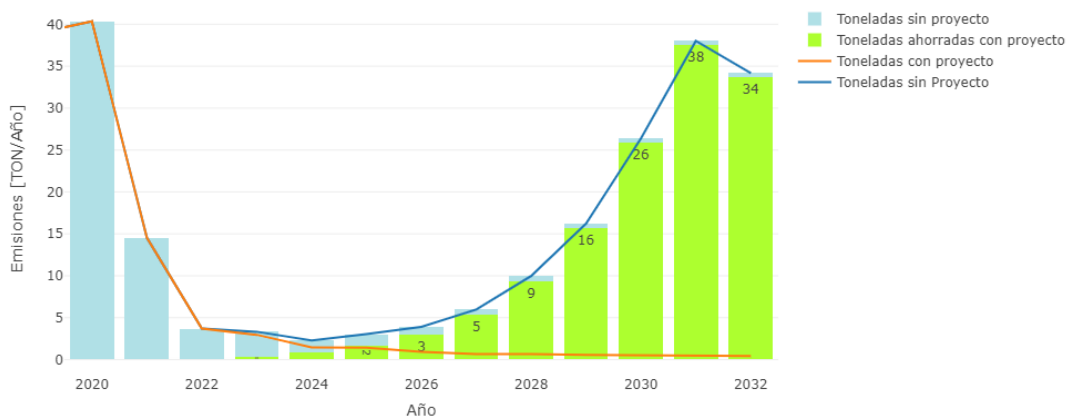


Tabla 14: Emisiones MP2.5 [ton/año], evitadas en cada año de aplicación de la norma NP.

AÑO	SIN PROYECTO [Ton]	CON PROYECTO [Ton]	EMISIONES EVITADAS [Ton]
2023	3.32	2.96	0.37
2024	2.27	1.44	0.83
2025	3.04	1.42	1.61
2026	3.91	0.93	2.98
2027	5.97	0.67	5.30
2028	9.97	0.67	9.30
2029	16.25	0.55	15.70
2030	26.38	0.52	25.85
2031	38.00	0.47	37.53
2032	34.18	0.43	33.75

5. ANÁLISIS DE IMPACTO SOCIAL Y ECONÓMICO

5.1. ESTIMACIÓN DE COSTOS

La medida en estudio considera la implementación de una norma de límite máximo de emisión de NP en los gases de escape de buses RED. Esta norma será controlada en las Plantas de Revisión Técnica de Buses de la RM y en el control en vía pública que realiza el Programa Nacional de Fiscalización del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Por tanto, existen costos de inversión, de operación y de mantención incrementales para el control de este nuevo estándar de emisiones, en las Plantas de Revisión Técnica. Por su parte, el Programa Nacional de Fiscalización deberá reemplazar el actual control de opacidad en vía pública por el control de NP para los buses sujetos a la norma, lo que significará a su vez costos de inversión, de operación y de mantención incrementales.

Respecto de los operadores de buses con DPF, tendrán costos de recambio del DPF en los buses rechazados en el control y costos de inversión, de operación y de mantención por la adquisición de equipos de medición para el autodiagnóstico.

Costos de reparación

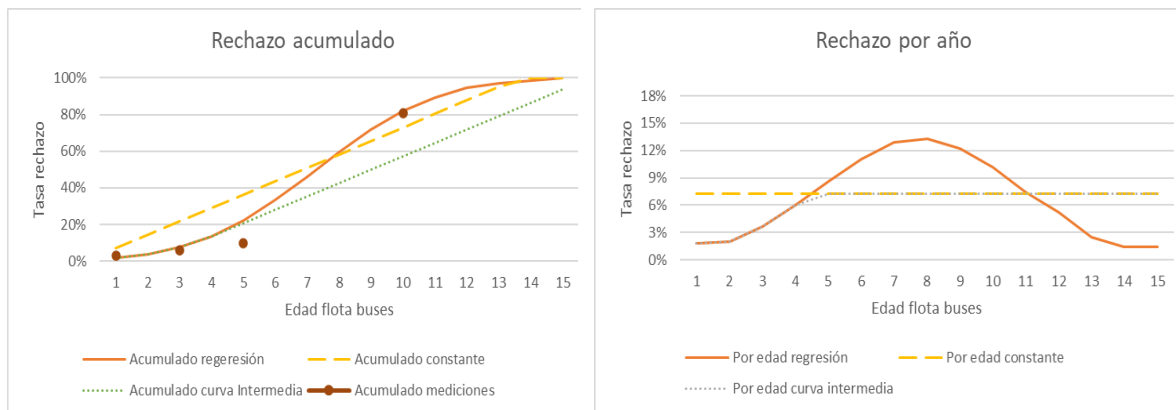
Para obtener las reducciones de emisiones que finalmente generan el beneficio en salud, es necesario que cada bus rechazado sea reparado. Para obtener los costos generados por reparación, se estima la cantidad de buses rechazados y reparados. Para las tasas de rechazo se han considerado tres escenarios que se explican a continuación:

- **Curva Modelo Regresión:** Rechazo modelado a partir de la regresión ajustada con las mediciones históricas. Corresponde a las tasas de rechazo presentadas en la Tabla 6 de este informe. Considera la distribución normal de las emisiones de NP en torno a un valor medio. Como el valor medio de la flota depende de la antigüedad, año a año una mayor fracción acumulada de la flota excede la norma. Cuando hay reparación se entiende que el rechazo no se acumula, sino que corresponde a una tasa de rechazo que es función de la antigüedad de la flota.
- **Curva Tasa Constante:** Corresponde a una tasa de rechazo constante de la flota. En este caso se estima el rechazo a partir de las mediciones históricas de NP, considerando las tasas de rechazo en función de la antigüedad del punto anterior, pero ajustando una tasa constante (7,3%), que no depende de la antigüedad de la flota.
- **Curva Intermedia:** O curva mixta de rechazo. En este escenario se considera la tasa de rechazo modelada en el punto primero (modelo de regresión), hasta llegar al valor de rechazo constante y permanecer en este valor de rechazo en adelante.

Tabla 15: Resultados para las estimaciones de las tasas de rechazo con base en el inicio de la norma en 2023.

Edad bus	Curva Modelo Regresión		Curva Tasa Constante		Curva Intermedia		Mediciones
	% Rechazo acumulado	% Rechazo edad bus	% Rechazo acumulado	% Rechazo edad bus	% Rechazo acumulado	% Rechazo edad bus	% Rechazo acumulado
1	1,8%	1,8%	7,3%	7,3%	1,8%	1,8%	3,0%
2	3,8%	2,0%	14,6%	7,3%	3,8%	2,0%	
3	7,5%	3,7%	21,9%	7,3%	7,5%	3,7%	6,0%
4	13,5%	6,0%	29,2%	7,3%	13,5%	6,0%	
5	22,1%	8,6%	36,5%	7,3%	20,8%	7,3%	10,0%
6	33,2%	11,1%	43,8%	7,3%	28,1%	7,3%	
7	46,1%	12,9%	51,1%	7,3%	35,4%	7,3%	
8	59,4%	13,3%	58,4%	7,3%	42,7%	7,3%	
9	71,6%	12,2%	65,7%	7,3%	50,0%	7,3%	
10	81,8%	10,2%	73,0%	7,3%	57,3%	7,3%	81,0%
11	89,3%	7,5%	80,3%	7,3%	64,6%	7,3%	
12	94,6%	5,3%	87,6%	7,3%	71,9%	7,3%	
13	97,1%	2,5%	94,9%	7,3%	79,2%	7,3%	
14	98,5%	1,5%	100,0%	7,3%	86,5%	7,3%	
15	100,0%	1,5%	100,0%	7,3%	93,8%	7,3%	

Ilustración 24: Comparación de las curvas de rechazo.



Un supuesto, al momento de aplicar las curvas de rechazo, es que la tasa de rechazo depende de la antigüedad de la flota de buses y no de la antigüedad del DPF. Esto puede justificarse sabiendo que la correcta operación del DPF está sujeta a las condiciones de operación del motor (temperaturas, emisiones de MP, emisiones de NOx, etc) y que finalmente el deterioro de la condición del motor determina la probabilidad de falla mayor o menor del filtro. Es decir, se ha supuesto que el recambio del DPF no afecta la probabilidad de falla que está dada por la antigüedad del motor y no del filtro.

Al examinar los resultados en la aplicación de las tres curvas de rechazo, para el 2023-2032 se observa lo siguiente:

Tabla 16: Rechazos 2023-2032.

	Rechazos 2023	Rechazos 2023-2032
Modelo regresión	406	4255
Modelo constante	976	4246
Modelo intermedio	397	3064

Como el primer año de aplicación de la norma el rechazo será el acumulado según la edad promedio de la flota, se observa de la Tabla 16 que el modelo constante acumula mayor cantidad de buses rechazados a la partida de la norma (2023), pero esto se compensa hasta el 2032. Finalmente, en el total de rechazos, el modelo intermedio resulta el más favorable en el total de rechazos del periodo.

Para el análisis costo-beneficio de la norma se sensibilizarán los resultados por los tres escenarios de curva de rechazo. No obstante, en adelante se utilizará en este informe el modelo de tasa de rechazo constante, con 7,3% de rechazo anual sobre la flota EURO VI.

Como vemos de la Tabla 16, al momento de implementar la norma habrá una tasa de rechazo acumulada que dependerá de la distribución de la edad de los buses EURO VI en la flota RED, al año 2023. Esta distribución de la edad de la flota EURO VI la podemos ver en la siguiente tabla 17, que es el resultado del modelo de cálculo que incorpora los criterios de retiro y renovación de buses.

Tabla 17: Distribución de la edad de los buses EURO VI en la flota RED para el periodo en estudio.

EDAD	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1	784	1392	1380	154	363	1	129	105	0	463	550	972	965
2	613	784	1392	1380	154	363	1	129	105	0	463	550	972
3	2	613	784	1392	1380	154	363	1	129	105	0	463	550
4	8	2	613	784	1392	1380	154	363	1	129	105	0	463
5	1	8	2	613	784	1392	1380	154	363	1	129	105	0
6	0	1	8	2	613	784	1392	1380	154	363	1	129	105
7	0	0	1	8	2	613	784	1392	1380	154	363	1	129
8	0	0	0	1	8	2	613	784	1392	1380	154	363	1
9	0	0	0	0	1	8	2	613	784	1392	1380	154	363
10	0	0	0	0	0	1	8	2	613	784	1392	1380	154
TOTAL	1408	2800	4180	4334	4697	4698	4826	4923	4921	4771	4537	4117	3702

Considerando entonces para el año 2023, de inicio de la norma de NP, el valor de rechazo acumulado que nos entrega la Tabla 16 y las tasas modeladas para los años sucesivos, se obtienen las reparaciones en el escenario con proyecto de norma. La Tabla 19 muestra la

flota de buses EURO VI para los años del periodo en estudio y la tasa de rechazo para cada año. Como se observa, el año 2023 se estima una tasa un poco mayor, producto de la acumulación de buses con falla provenientes de los distintos años de incorporación a la flota (22,5%).

En cuanto a los costos de reparación se cuenta, al momento de este informe con valores de equipos originales (OE) y de “aftermarket” (AM), es decir piezas de recambio alternativas suministradas en el mercado local, con los siguientes costos¹⁵:

Tabla 18: Costos de reparación por recambio del módulo filtrante para los buses rechazados [USD].

MARCA	OE/AM	PRECIO MÓDULO FILTRANTE EN CHILE		PRECIO DE SELLO Y ABRAZADERAS EN CHILE		SERVICIO DE RECAMBIO		TOTAL	
		USD \$	CLP \$	USD \$	CLP \$	USD \$	CLP \$	USD \$	CLP \$
M. BENZ	OE	\$ 1.728	\$1.368.282	\$ 286	\$ 226.482	\$ 184	\$ 146.048	\$ 2.198	\$1.740.812
VOLVO-SCANIA	OE	\$ 4.104	\$3.250.551	\$ 286	\$ 226.482	\$ 584	\$ 462.883	\$ 4.975	\$3.939.916
M. BENZ	AM	INCLUIDO		INCLUIDO		INCLUIDO		\$ 3.157	\$2.500.000
VOLVO	AM	INCLUIDO		INCLUIDO		INCLUIDO		\$ 3.157	\$2.500.000

Los valores de la Tabla 18 se calcularon a partir de valores Ex Work, de los productos en Alemania y consideran un 30% de recargo por costos de impuestos y transporte. Para los tipos de cambio USD/EUR y CLP/USD, se utilizó el valor promedio enero-diciembre 2020 del tipo de cambio observado que publica el Banco Central. Para el servicio de recambio se ajustó el precio por paridad de poder adquisitivo (Datos LCU-Pib Banco Mundial, valores 2020 según proyección de crecimiento con base en periodo 2009-2019) y se ajustó por IPC hasta 2021.

Un bus con fallas en el DPF deberá cambiar el módulo filtrante, que es la pieza que retiene el particulado. Todos los demás componentes permanecen los mismos. Además, debe considerar accesorios necesarios para el recambio y que nos son recuperables (sellos y abrazaderas). Por último, el servicio de recambio que considera las horas de mano de obra y herramientas.

El costo final depende de la decisión de los operadores entre los repuestos originales o los alternativos. Esta decisión depende de los precios y la reglamentación al respecto. Considerando que a la fecha no existe regulación que permita el uso de equipos alternativos en los buses de la flota RED, en adelante se supone que sólo se utilizan los repuestos originales y por tanto son los precios que definen el costo del programa. No obstante, en el

¹⁵ Los valores fueron suministrados por la industria en Alemania (Puritech y A. Mayer), para equipos OEM y por Purexhaust para aftermarket.

capítulo 7 se sensibilizarán los resultados considerando la existencia de equipos alternativos.

Para estimar un costo medio para la reparación, se utilizó una participación del 50% de la marca Mercedes Benz en la flota EURO VI. El otro 50% lo tienen entre Volvo y Scania para los que se considera el mismo costo de reparación. Esto es coincidente con la actual participación de dichas marcas en la flota RED.

- Costo medio de recambio módulo filtrante buses EURO VI: USD \$ 3.586

Estos precios consideran el recambio del elemento o módulo filtrantes, que es una pieza fácilmente removible en los sistemas DPF y cuya falla origina la pérdida de eficiencia en la retención del MP. Los valores no incluyen IVA y consideran costos de mano de obra por instalación. A continuación, se presentan tablas resumen con el número de rechazos/reparaciones al año, durante el periodo en estudio, y el costo de dichas reparaciones, considerando CLP y USD año 2021.

Tabla 19: Costos de reparación. Buses EURO VI

Flota		Modelo constante			
Año	Flota	% Rechazo	Rechazo	Costo MM CLP \$	Costo USD \$
2023	4334	22,5%	976	\$2.772	\$3.500.247
2024	4697	7,3%	343	\$974	\$1.230.107
2025	4698	7,3%	343	\$974	\$1.230.107
2026	4826	7,3%	352	\$1.000	\$1.262.384
2027	4923	7,3%	359	\$1.020	\$1.287.488
2028	4921	7,3%	359	\$1.020	\$1.287.488
2029	4771	7,3%	348	\$988	\$1.248.039
2030	4537	7,3%	331	\$940	\$1.187.071
2031	4117	7,3%	300	\$852	\$1.075.896
2032	3702	7,3%	269	\$764	\$964.720

El aumento de los costos para los años 2026 a 2028, corresponde al máximo tamaño de flota diésel EURO VI, en dichos años, luego comienza el retiro de buses EURO VI que ya han cumplido los 10 años de antigüedad. En cuanto a los costos de implementación de la tecnología de medición en las plantas de revisión técnica y en la fiscalización en la vía pública, se consideran los siguientes parámetros para el cálculo:

Tabla 20: Parámetros para el cálculo de costo por equipamiento

Ítem	Valor	Unidad	Justificación
Valor equipo NP puesto en Chile antes de impuestos	11.600	USD	Cotización TEN
Número de estaciones PRT y Vía Pública	40	Equipos	4 plantas buses (5 equipos x planta) + 20 equipos vía pública
Número de equipos diagnóstico operadores	20	Equipos	Igual número equipos que PRT
Costos mantención/calibración equipos	617	USD/Equipo-año	Ministerio de Infraestructura y Aguas de Holanda (RDW)
Ahorro en tiempo de ensayo (10 vs 2 min.)	8	min/prueba	Ministerio de Infraestructura y Aguas de Holanda (RDW)
Número de pruebas al año	25.463	pruebas/año	2 pruebas x bus en PRT + 1 prueba x bus operadores + 50% de la flota en vía pública.
Ahorro total tiempo de ensayo	3.395	horas/año	Resultado
Precio por hora un mecánico	10.000	CLP/hora	Con base en sueldo mecánico.
Ahorro en dinero por tiempo de ensayo	33.950.000	CLP/año	Resultado

Bajo estas consideraciones se calcula a continuación el costo de inversión y de operación para el periodo de análisis.

Tabla 21: Costos por equipamiento

AÑO	INVERSIÓN EQUIPOS		COSTO OPERACIÓN		AHORRO TIEMPO ENSAYO		TOTAL	
	CLP \$	USD \$	CLP \$	USD \$	CLP \$	USD \$	CLP \$	USD \$
2023	\$ 51.232.000	\$ 696.000	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ 546.615.333	\$ 690.171
2024	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2025	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2026	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2027	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2028	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2029	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2030	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2031	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829
2032	\$ -	\$ -	\$ 29.333.333	\$ 37.037	\$ 33.950.000	\$ 42.866	\$ -4.616.667	\$ -5.829

Los valores de la Tabla 21 corresponden a CLP y USD año 2021. Combinando los costos de las Tablas 20 y 21, obtenemos el costo total de la medida en el periodo de análisis:

Tabla 22: Costos total de la medida

Año	MM \$ CLP	\$ USD
2023	\$3.319	\$4.190.418
2024	\$970	\$1.224.278
2025	\$970	\$1.224.278
2026	\$995	\$1.256.555
2027	\$1.015	\$1.281.659
2028	\$1.015	\$1.281.659
2029	\$984	\$1.242.210
2030	\$936	\$1.181.242
2031	\$847	\$1.070.066
2032	\$759	\$958.891
VAN 2021 (6%)	\$8.221	\$10.380.376

Los valores de la Tabla 22 están en moneda 2021 y el VAN se calculó también para año 2021, con tasa de descuento del 6%. Bajo estas consideraciones, el costo total en valor actualizado al 2021, con tasa de descuento del 6%, es de MM CLP \$ 8,221.

5.2. CAMBIO EN LAS CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS

A partir de la modelación de las emisiones con y sin proyecto para el horizonte de evaluación, contaremos con ΔE_i , como el cambio de emisiones para cada periodo anual / entre 2023 y 2032. Para determinar el cambio, producto de esta variación anual de las emisiones, en las concentraciones del contaminante en estudio, y que es el generador de los efectos en salud, se utilizará el modelo roll-back, para cada periodo hasta el horizonte de evaluación. Esto supone una relación lineal entre las emisiones del contaminante y la concentración que genera, lo que permite construir los factores emisión-concentración (FEC), utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 9: } FEC_i^t \left(\frac{\text{ton}}{\mu\text{g}/\text{m}^3} \right) = \left(\frac{\partial C_i^t(\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\partial E_i^t(\text{ton})} \right)^{-1} \approx \left(\frac{E_i^t(\text{ton})}{C_i^t(\mu\text{g}/\text{m}^3)} \right)$$

$FEC_i^t \left(\frac{\text{ton}}{\mu\text{g}/\text{m}^3} \right)$: Factor emisión-concentración en la zona o región i en el año t

$C_i^t(\mu\text{g}/\text{m}^3)$: Concentración ambiental del contaminante en estudio, en la zona o región i para el año t

$E_i^t(\text{ton})$: Emisión del contaminante en estudio, en la zona o región i para el año t

Para el estudio se considera utilizar el valor de $FEC=481$ [ton/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$], utilizado anteriormente por el Ministerio del Medio Ambiente en otros AGIES, tales como [AGIES PPDA 2015] o [AGIES MMFR 2019].

5.3. ESTIMACIÓN DE EFECTOS

Del paso anterior contaremos con los cambios en las concentraciones de MP2.5 (ΔC_i), para cada año l entre 2023 y 2032. Para estimar la incidencia de estos cambios en la calidad del aire, en los efectos en salud, se utilizarán relaciones concentración-respuesta linealizadas, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 10: } \Delta E_{ij}^k = [\exp(\beta_{ij}^k \cdot \Delta C^k) - 1] Pop_j^k IR_{ij} \cong \beta_{ij}^k \cdot \Delta C^k \cdot Pop_j^k \cdot IR_{ij}$$

- ΔE_{ij}^k : Cambio en el número de efectos i debido al cambio en la concentración atmosférica del contaminante k en el segmento j de la población.
- β_{ij}^k : Coeficiente de riesgo unitario del efecto i en el segmento j de la población para cambios en la concentración atmosférica del contaminante k
- ΔC^k : Cambio en la concentración atmosférica del contaminante k
- Pop_j^k : Número de personas en grupo etario j de la población, expuesta al contaminante k
- IR_{ij} : Tasa de incidencia del efecto i en el segmento j de la población

Los coeficientes de riesgo unitario para los efectos en salud y rangos etarios considerados son los propuestos en [ATICA1], los que se muestran a continuación:

Tabla 23: Coeficientes de riesgo unitario

Tipo de Efecto	Efecto detalle	Nomenclatura	β_{ij}				Referencia
			0-17	18-29	30-64	+65	
Mortalidad	Cardiopulmonar largo plazo	M-CPM->30años			0.97 %	0.97 %	Pope et al. (2004)
Admisión Hospitalaria	Asma	HA-AST-<65	0.34 %	0.34 %	0.34 %		Sheppard (2003)
	Cardiovascular	HA-CVD-18-64		0.15 %	0.15 %		Moolgavkar (2000)
	Cardiovascular	HA-CVD-65+				0.16 %	Moolgavkar (2000)
	Resp. Crónicas	HA-CLD-18-64		0.24 %	0.24 %		Moolgavkar (2000)
	Resp. Crónicas	HA-CLD-65+				0.12 %	Ito (2003)
	Neumonía	HA-PNEU-65+				0.41 %	Ito (2003)
Vistas salas de emergencia	Bronquitis	ER-BRO-0-17	0.45 %				Dockery (1989)
Productividad Perdida	Días laborales	WLD-18-64		0.47 %	0.47 %		Ostro (1987)
	Días actividad restringida	RAD--18-64		0.49 %	0.49 %		Ostro (1987)

Considerando las emisiones evitadas con proyecto, que se indican en la Tabla 14, y el valor FEC indicado en 5.2, podemos calcular la reducción de las concentraciones con proyecto, como sigue:

$$\text{Ecuación 11: } \Delta C^k = \frac{\Delta E_i^t (\text{ton})}{FEC_i^t \left(\frac{\text{ton}}{\mu\text{g}/\text{m}^3} \right)}$$

Tabla 24: Reducción de las concentraciones de MP2.5 con proyecto

Año	MP2.5 [Ton]	MP2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
2023	0,37	7,7,E-04
2024	0,83	1,7,E-03
2025	1,61	3,3,E-03
2026	2,98	6,2,E-03
2027	5,3	1,1,E-02
2028	9,3	1,9,E-02
2029	15,7	3,3,E-02
2030	25,85	5,4,E-02
2031	37,53	7,8,E-02
2032	37,53	7,0,E-02

5.4. TASAS DE INCIDENCIA BASE

Para la estimación de los efectos en salud se consideraron las tasas de incidencia (TI), de [ATICA1] y [ATICA2]. Entre las principales diferencias encontradas entre ambas TI, son las siguientes:

- ATICA1 considera TI para todos los efectos, en 9 rangos etarios diferentes.
- ATICA2 considera TI sólo en los rangos etarios de interés para cada uno de los efectos.
- Al considerar, por ejemplo, el efecto M-CPM->30 años, podemos encontrar en ATICA1 cuatro rangos etarios (6, 7, 8 y 9), cada uno con su tasa de incidencia. En cambio, ATICA2 considera un solo rango etario (>30 años), con una sola TI.

- En ATICA1 las TI para el efecto M-CPM->30 años, pueden variar hasta en 2 órdenes de magnitud entre el rango 6 y el 9, por lo que el envejecimiento de la población tiene un efecto muy amplificado en ATICA1, no así en ATICA2, pues no se hace una división en rangos etarios dentro del efecto estudiado.
- Lo anterior provoca una diferencia en el número de casos, que se incrementa en el tiempo, considerando los aumentos de la población y su envejecimiento, como se ve a continuación.

Tabla 25: Número de casos M-CPM->30 años, para la RM. ATICA1 vs ATICA2

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
ATICA1	19.402	20.107	20.840	21.600	22.356	23.176	24.115	25.099	26.113	27.142	28.190	29.250	30.337
ATICA2	16.579	17.033	17.422	17.776	18.109	18.426	18.727	19.007	19.265	19.501	19.716	19.907	20.081
Diferencia	15%	15%	16%	18%	19%	20%	22%	24%	26%	28%	30%	32%	34%

Considerando lo anterior, particularmente respecto de los casos de mortalidad, la evaluación con ATICA1 resulta más favorable para los beneficios en salud. Por otro lado, teniendo en cuenta que el Departamento de Economía Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, aún está en proceso de elaboración del modelo de evaluación de las tasas desagregadas, la evaluación se realizará considerando las TI de ATICA1. No obstante en el capítulo 7, se sensibilizarán los resultados con ambos valores de TI.

A continuación, considerando las reducciones en las concentraciones de MP2.5 con proyecto de la Tabla 24, y utilizando las TI de ATICA1, se calculan los casos evitados de mortalidad y morbilidad, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 26: Número de casos evitados con proyecto.

Evento	Casos evitados 2023-2032	Intervalo de confianza 90%
Mortalidad	76	[37-116]
H. Hospitalarias	50	[23-77]
Visitas salas urgencia	1.156	[399-1.913]
Restricción activ. (días)	59.099	[52.784-65.415]

5.5. VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS

Los efectos en salud, cuantificados en número de casos anuales evitados, por reducción de las concentraciones de MP2.5, se monetizarán para poder valorarlos económicamente y llevarlos a beneficios sociales económicamente valorados.

Los valores unitarios de casos evitados para la valorización de efectos que se presentan en la siguiente Tabla, corresponden a los valores utilizados en [AGIES MMFR 2019].

Tabla 27: Valor unitario de los casos evitados

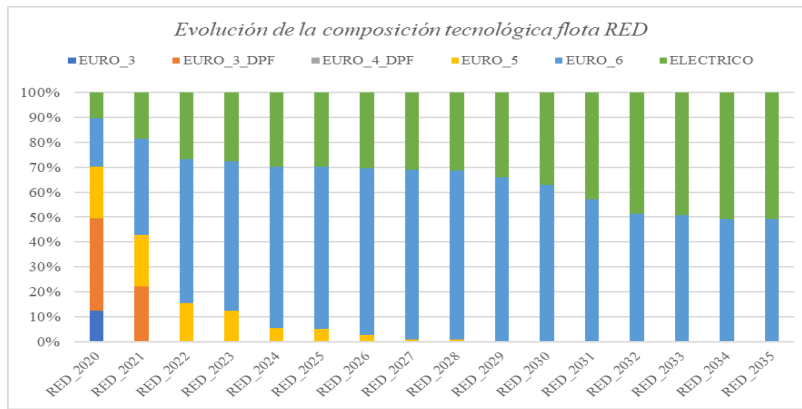
Descripción	Unidad	Valores
M-CPM->30años	UF	15.805
HA-AST-<65	UF	27
HA-CVD-18-64	UF	60
HA-CVD-65+	UF	60
HA-CLD-18-64	UF	38
HA-CLD-65+	UF	39
HA-PNEU-65+	UF	42
ER_BRO-0-17	UF	1,7
RAD-18-64	UF	0,3
WLD-18-64	UF	0,9

La proyección de beneficios en el tiempo considerará la proyección de la población afectada, según proyecciones demográficas. A continuación, se presenta la valoración de los beneficios, considerando CLP y USD año 2020 y el valor UF a enero 2021.

Tabla 28: Beneficios por casos evitados

Año	USD \$
2023	\$96.295
2024	\$223.375
2025	\$448.792
2026	\$863.524
2027	\$1.596.956
2028	\$2.912.838
2029	\$5.106.795
2030	\$8.725.688
2031	\$13.134.679
2032	\$12.241.642
VAN 2021	\$ 24.989.505

6. RESULTADOS



*Ilustración 25:
Composición tecnológica flota RED.*

La flota RED se considera constante en el periodo 2023 y 2032 de aplicación de la norma (7275 buses). Se modifica la composición tecnológica según criterio de renovación de 10 años de antigüedad máxima y según programa de renovación de DTPM. 30% de la flota nueva se considera de propulsión eléctrica.



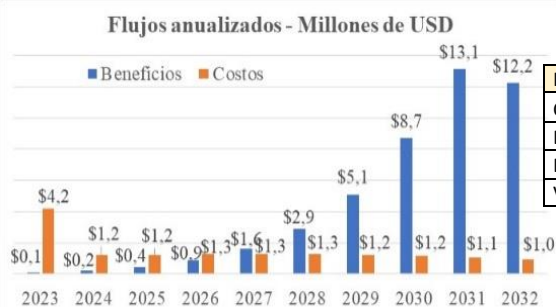
*Ilustración 26:
Composición tecnológica flota RED.*

Línea base considera las emisiones de la flota con deterioro del DPF según antigüedad de los buses. Escenario con proyecto considera eficiencia de fábrica para el DPF. Se observa como el deterioro creciente de la eficiencia de los filtros impacta fuertemente las emisiones de los buses EURO VI.

Evento	Casos evitados 2023-2032	Intervalo de confianza 90%
Mortalidad	76	[37-116]
H. Hospitalarias	50	[23-77]
Visitas salas urgencia	1.156	[399-1.913]
Restricción activ. (días)	59.099	[52.784-65.415]

*Ilustración 27:
Composición tecnológica flota RED.*

Como se observa, el acumulado de casos de muertes prematuras evitadas alcanza a las 76 durante el periodo 2023-2032.



Indicador	Valor MM USD \$
Costos	\$10,4
Beneficios	\$25,0
B/C	2,4
VAN	\$14,6

*Ilustración 28:
Indicadores económicos.*

La presente normativa tiene una relación beneficio costo de 2,4 y el valor actual neto de \$ 14,6 millones de dólares.

7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los resultados presentados en este informe corresponden a un escenario más probable o intermedio que utiliza supuestos respecto de la curva de rechazo, el uso de repuestos originales, valores de coeficiente de riesgo unitario, valor estadístico de la vida y tasas de incidencia base. Mediante el uso del modelo de cálculo desarrollado en Excel se presenta a continuación la sensibilización de estos parámetros en un escenario favorable, otro intermedio y uno desfavorable de análisis, para verificar si en alguno de estos escenarios la regulación propuesta deja de ser socialmente rentable.

Escenario	B/C	Descripción
Favorable	12,6	Curva intermedia de rechazo / menor precio (AM-OE) / $\beta = \text{ATICA 1} / \text{VEV} = \text{OCDE} / \text{TI} = \text{ATICA1}$
Desfavorable	1,3	Tasa constante de rechazo / Sólo OE / $\beta = \text{MMFR} / \text{VEV} = \text{MMFR} / \text{TI} = \text{ATICA 2}$
Intermedio	2,4	Tasa constante de rechazo / Sólo OE / $\beta = \text{ATICA 1} / \text{VEV} = \text{MMFR} / \text{TI} = \text{ATICA 1}$

El valor de $\beta = \text{MMFR}$, considera para M-CPM->30años un valor de 0,86%, utilizado en [AGIES MMFR 2016]. A su vez el valor $\text{VEV} = \text{OCDE}$, corresponde a MM USD \$ 1.344.

En todo caso en todos los escenarios el indicador B/C resulta mayor que 1.

ANEXO 1: GRÁFICOS Y ESTADÍSTICA

A1.1 ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS MEDICIONES NP BUSES RED

'data.frame': 600 obs. of 36 variables:

\$ N : num 52 44 53 35 43 51 34 39 41 201 ...

\$ FECHA : POSIXct, format: "2020-01-13" "2020-01-13" "2020-01-13" "2020-01-13" ...

\$ PATENTE : Factor w/ 587 levels "BBKD25","BDWL45",...: 429 405 434 403 407 431 433 414 417 399 ...

\$ TIPO_BUS : Factor w/ 6 levels "A1","A2","B",...: 5 5 5 5 5 NA 5 5 ...

\$ UNIDAD_NEG : Factor w/ 7 levels "U1","U2","U3",...: 2 2 2 2 2 2 2 2 ...

\$ TERMINAL : Factor w/ 17 levels "BCG1","Camilo Henriquez",...: 8 8 8 8 8 8 8 8 6 ...

\$ MARCA_CHASIS : Factor w/ 3 levels "MERCEDES BENZ",...: 3 3 3 3 3 3 3 3 ...

\$ MODELO_CHASIS : Factor w/ 14 levels "B 250 R","B 290 RLE",...: 4 4 4 4 4 4 4 4 ...

\$ MODELO_MOTOR : Factor w/ 12 levels "D7E 290","D8C 250",...: 3 3 3 3 3 3 3 3 ...

\$ KM : num 13502 13831 15129 18278 20822 ...

\$ AÑO_BUS : num 2019 2019 2019 2019 2019 ...

\$ AÑO_DPF : num 2019 2019 2019 2019 2019 ...

\$ MEDIDA1_RAL : num 2473 1143 2150 385 353 ...

\$ MEDIDA2_RAL : num 2344 397 2119 386 400 ...

\$ PROMEDIO_RAL : num 24085 770 21345 3855 3765 ...

\$ LINEA_BASE : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...

\$ EFICIENCIA : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...

\$ NORMA_RAL : logi NA NA NA NA NA NA ...

\$ EURO : Factor w/ 8 levels "EURO III","EURO III F",...: 4 4 4 4 4 4 4 4 ...

\$ DPF : Factor w/ 4 levels "E III FAB","E III RET",...: 3 3 3 3 3 3 3 3 ...

\$ SCR : Factor w/ 2 levels "NO","SI": 2 2 2 2 2 2 2 2 ...

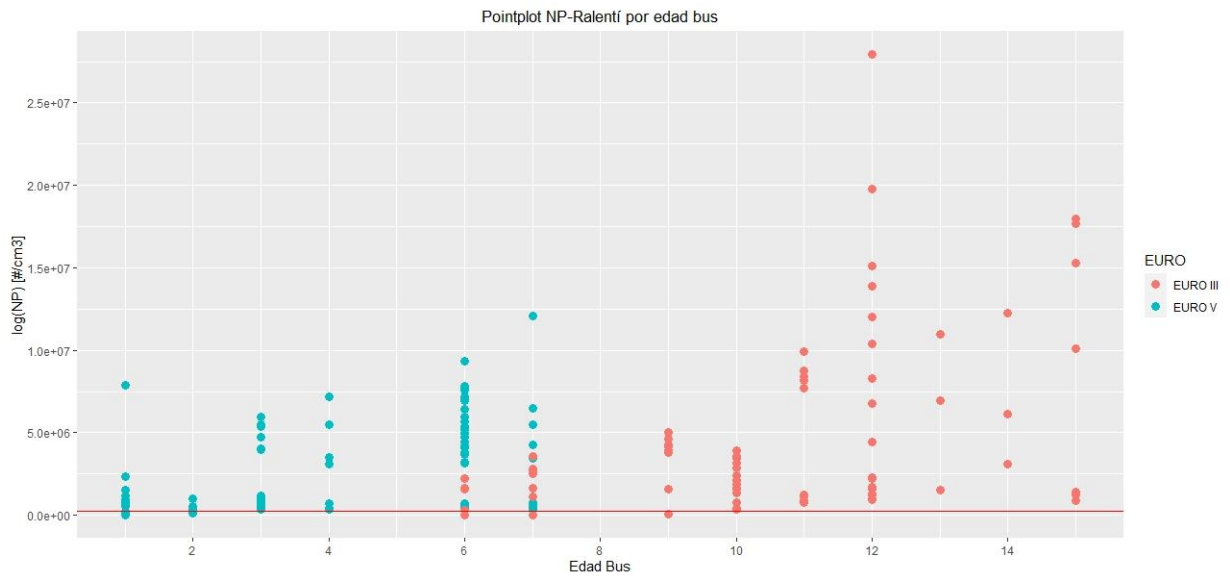
\$ RESULTADO : Factor w/ 2 levels "cumple","no cumple": NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...

\$ AÑO_MED : num 2020 2020 2020 2020 2020 2020 2020 2020 2020 ...

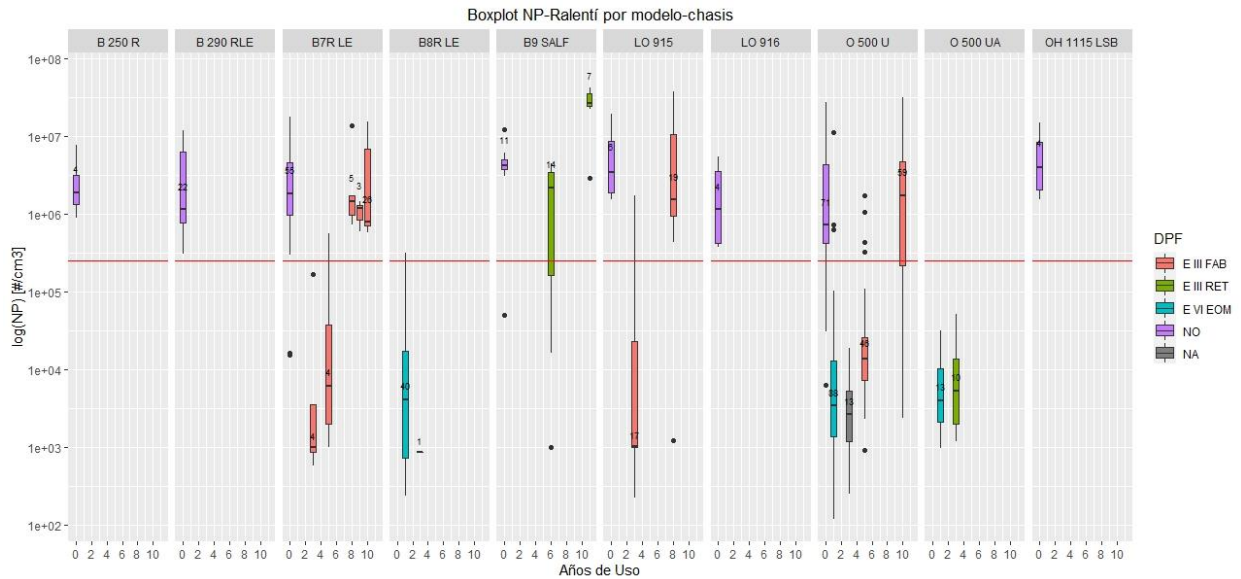
\$ MARCA_DPF : Factor w/ 3 levels "EMINOX","HJS",...: NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...

\$ OPACIDAD : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ MEDIDA1_LIBRE : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ MEDIDA2_LIBRE : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ MEDIDA3_LIBRE : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ PROMEDIO_LIBRE: num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ MEDIDA1_MAX : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ MEDIDA2_MAX : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ MEDIDA3_MAX : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ PROMEDIO_MAX : num NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ OBS_EQUIPO : Factor w/ 4 levels "FALLA EQUIPO (FLOW ERROR)",...: NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
\$ EDAD_BUS : num 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
\$ EDAD_DPF : num 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...

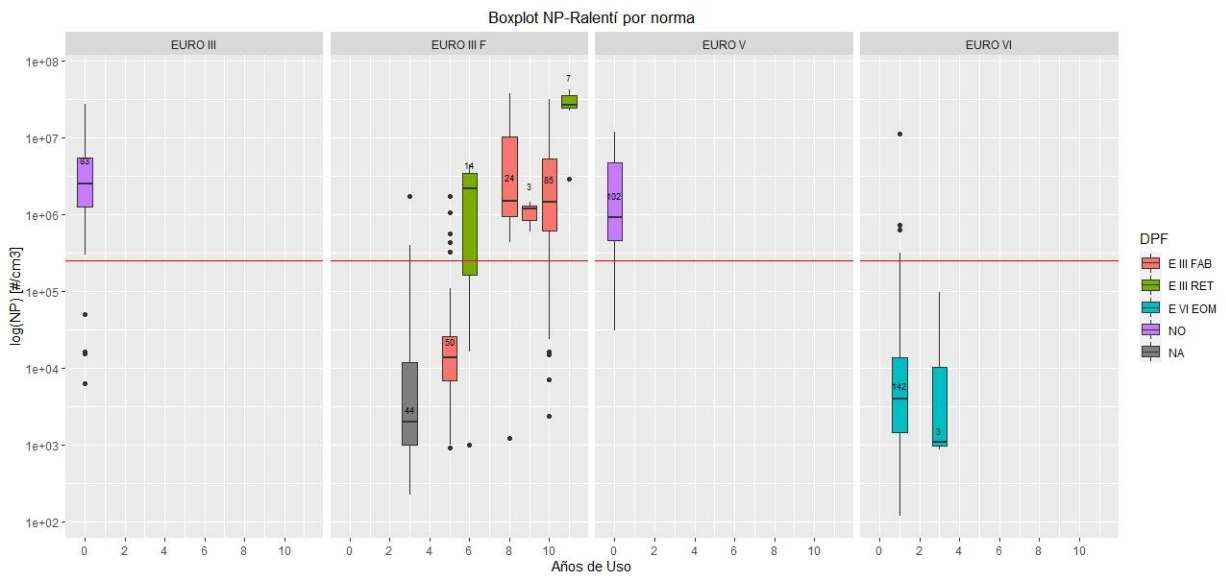
A1.2 GRÁFICO DE PUNTOS CON VARIABLE Y SIN LOG10



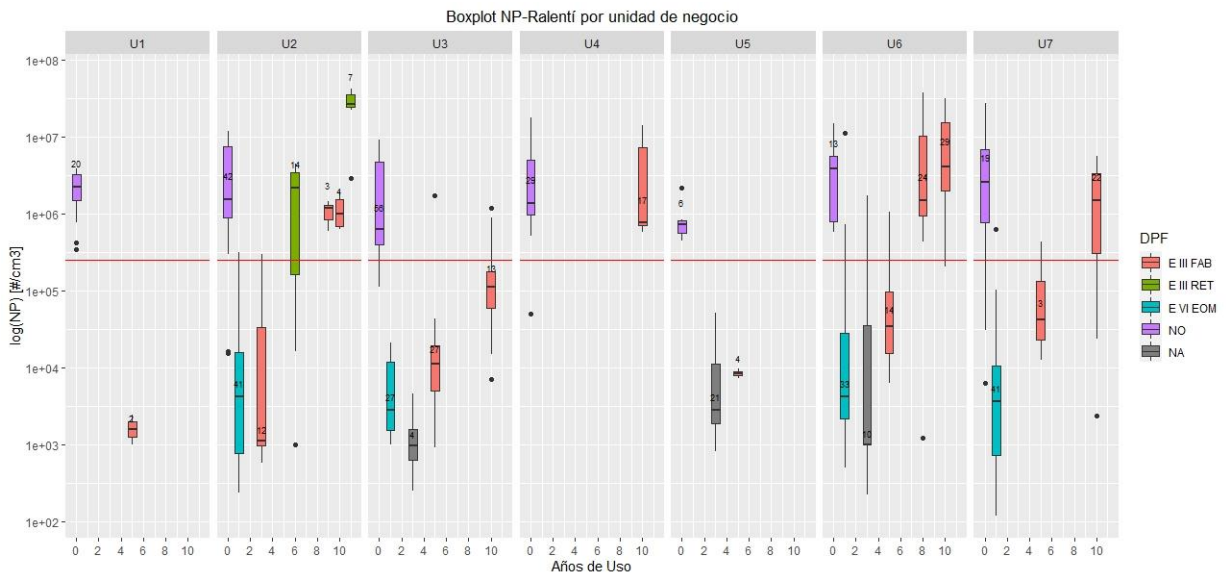
A1.3 GRÁFICO BOXPLOT NP POR AÑOS DE USO, CHASIS Y TIPO DPF



A1.4 GRÁFICO BOXPLOT NP POR AÑOS DE USO, ESTÁNDAR EURO Y TIPO DPF

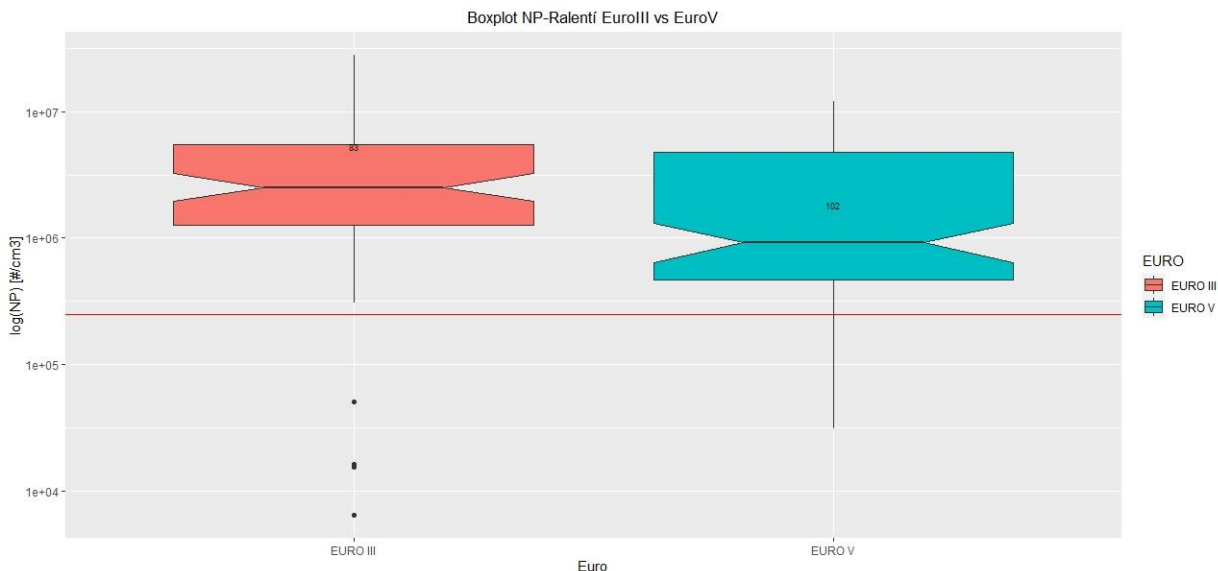


A1.5 GRÁFICO NP POR AÑOS DE USO, UNIDAD DE NEGOCIO Y TIPO DPF (NO=CORRESPONDE A EDADES CON SUPERPOSICIÓN DE TECNOLOGÍAS)



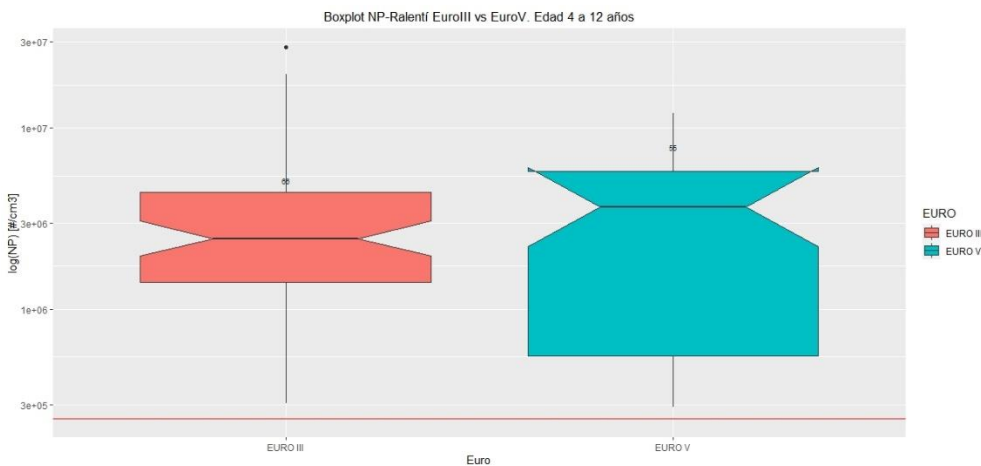
A1.6 GRÁFICO HISTOGRAMA DE NP TIPO DPF

En el gráfico, se observa un diagrama de caja con muescas, las que se extienden $1.58 * \frac{IQR}{\sqrt{n}}$, donde IQR es el rango intercuartílico. Esto da un intervalo de confianza de aproximadamente el #95% para comparar medianas y por ende las poblaciones y se observa que las medianas se encuentran fuera de los rangos de intersección.

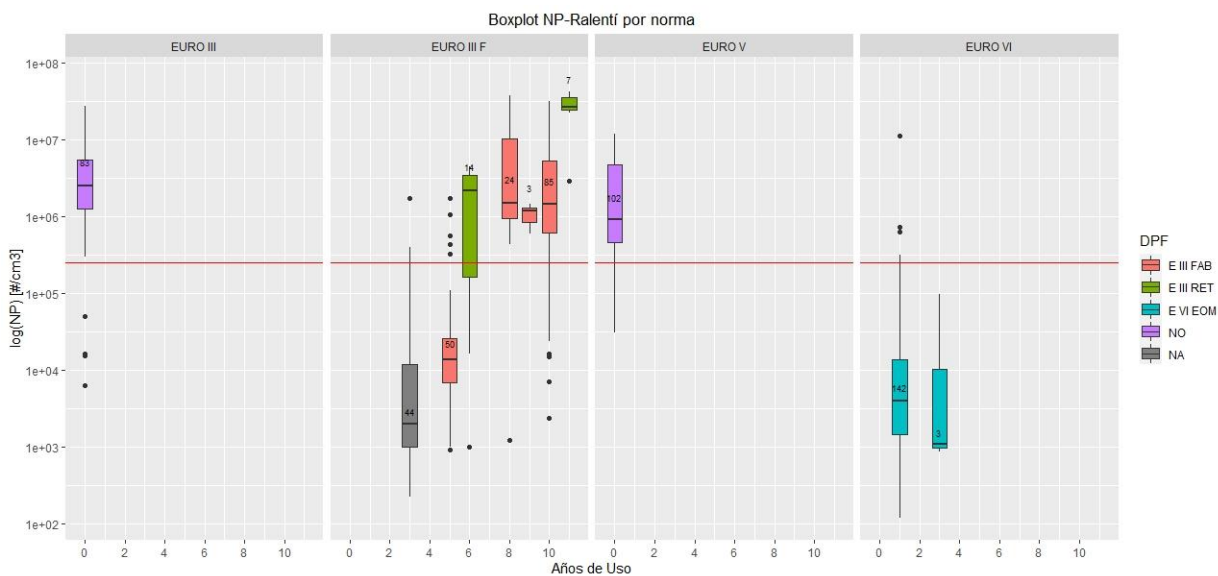


A1.7 GRÁFICO HISTOGRAMA DE NP POR AÑOS DE USO

Comparación de las flotas EURO III y EURO IV, descartando edades extremas y considerando entre 4 y 12 años de uso. No se puede afirmar que haya diferencia significativa entre ambas flotas.



A1.8 GRÁFICO BOXPLOT DE NP ESTÁNDAR EURO



A1.9 REPORTE ESTADÍSTICO DE LA REGRESIÓN: $\log_{10}(y) = \beta_1 * (x) + \beta_2$

#Residuals:

Min 1Q Median 3Q Max
 #-0.91413 -0.42453 0.00125 0.41343 0.93814

#Coefficients:

#	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
#(Intercept)	5.904559	0.072905	80.990	< 2e-16 ***
#EDAD_BUS	0.054990	0.008929	6.159	4.93e-09 ***

#---
 #Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

#Residual standard error: 0.4552 on 174 degrees of freedom
 #Multiple R-squared: 0.179, Adjusted R-squared: 0.1743
 #F-statistic: 37.93 on 1 and 174 DF, p-value: 4.932e-09

A1.10 REPORTE ESTADÍSTICO DE LA REGRESIÓN: $\log_{10}(y) = \beta_1 * (x) + \beta_2$

```

Residuals:
  Min   1Q   Median   3Q   Max
-2.8288 -0.6505 -0.0261  0.5868  3.5476

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.21373   0.07534   42.66 <2e-16 ***
EDAD_DPF     0.29948   0.01253   23.90 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.894 on 370 degrees of freedom
(17 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.6068, Adjusted R-squared:  0.6058
F-statistic: 571.1 on 1 and 370 DF, p-value: < 2.2e-16

```

A1.11 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES PARA LOS FACTORES DE EMISIÓN MODELADOS:

Desarrollo del factor de emisión modelado para EURO VI

$$fe_{VI}^{COP} = EC + OM = (0.15 * fe_{VI}^{COP}) + (0.85 * fe_{VI}^{COP})$$

$$EC = 0.15 * fe_{VI}^{COP} = fe_{VI,1}^{EC,MOT} * (1 - Efi)$$

$$fe_{VI,1}^{EC,MOT} = \frac{0.15 * fe_{VI}^{COP}}{(1 - Efi)}$$

Para año 1, $i = 1$, $Efi = 0.995$.

$$fe_{VI,1}^{EC,MOT} = 30 * fe_{VI}^{COP}$$

$$fe_{VI,1}^{OM} = 0.85 * fe_{VI}^{COP}$$

$$fe_{VI,i}^{MOD} = (1 - Efi) * 30 * fe_{VI}^{COP} + 0.85 * fe_{VI}^{COP}$$

fe_{VI}^{COP} : Factor de emisión masa MP2.5 COPERT para EURO VI

Efi : Eficiencia del DPF en NP.

- $fe_{VI,1}^{EC,MOT}$: Factor de emisión de EC en el motor antes del DPF, para un motor EURO VI.
 $fe_{VI,1}^{OM}$: Factor de emisión de OM para un motor EURO VI.
 $fe_{VI,i}^{MOD}$: Factor de emisión de MP2.5 para un motor EURO VI, modelando el deterioro del DPF

Desarrollo del factor de emisión modelado para EURO III

$$fe_{III}^{MOT} = fe_{III}^{COP} = fe_{III}^{EC} + fe_{III}^{OM}$$

$$fe_{III}^{CE} = 0.84 * fe_{III}^{COP}$$

$$fe_{III,1}^{CE} = (1 - Efi) * 0.84 * fe_{III}^{COP}$$

Para año 1, $i = 1$, $Efi = 0.995$.

$$fe_{III,1}^{CE} = 0.0042 * fe_{III}^{COP}$$

$$fe_{III,1}^{OM} = 0.16 * fe_{III}^{COP}$$

$$fe_{III,1}^{MOD} = 0.0042 * fe_{III}^{COP} + 0.16 * fe_{III}^{COP}$$

- fe_{III}^{MOT} : Factor de emisión masa MP2.5 en el motor para EURO III
 Efi : Eficiencia del DPF en NP.
 fe_{III}^{COP} : Factor de emisión COPERT en el motor antes del DPF, para un motor EURO III.
 fe_{III}^{EC} : Factor emisión EC en motor EURO III
 fe_{III}^{OM} : Factor emisión OM en motor EURO III
 $fe_{III,1}^{CE}$: Factor emisión EC en motor EURO III con DPF
 $fe_{III,1}^{MOD}$: Factor emisión MP2.5 que modela el deterioro del DPF

BIBLIOGRAFÍA

- [AGIES PPDA 2015] Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de plan de prevención y descontaminación de la Región Metropolitana.
- [AGIES 2016] Análisis General del Impacto Económico y Social Anteproyecto norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta. Ministerio de Medio Ambiente 2016.
- [AGIES 2017] Análisis General del Impacto Económico y Social Anteproyecto de revisión de norma primaria de calidad del aire para material particulado respirable MP10. Ministerio de Medio Ambiente 2017.
- [AGIES MMFR 2019] Actualización de costos y beneficios para el proyecto definitivo de la norma de emisión para maquinaria móvil fuera de ruta.
- [ATICA 1] Actualización de tasas de incidencia base, valores unitarios por eventos de morbilidad y análisis de funciones dosis – respuesta para contaminación atmosférica. GREENLAB 2015.
- [ATICA 2] Actualización de tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad para contaminación atmosférica y creación de un modelo automático para la actualización. GREENLAB 2020.
- [BURTSCHER 2019] A New Periodic Technical Inspection for Particle Emissions of Vehicles. Burtscher et al. Emission Control Science & Technology (2019).
- [GEASUR 2015] Apoyo al convenio: “Santiago de Chile Diesel Particle Filter Follow-Up Project”. GEASUR (2015)
- [GREENLAB 2013] “Guía Metodológica de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire” (2013)
- [MODEM 2010] Actualización Metodológica MODEM – MODEC para el Gran Santiago, DICTUC (2010)
- [SR 941.242] Ordinance of the FDJP on Exhaust Gas Analysers (VAMV) (2012)

- [TNO 2019] Proposal for a particulate filter test with a particle counter, In the Netherlands PTI (2019)
- [WG 2019] Particulate Number Counter. International Recommendations Instruments for measuring vehicle exhaust particulate number emissions. Part 1: Metrological and technical requirements (2019)



Programa Clima y Aire limpio
en Ciudades de América Latina

calac@swisscontact.org.pe

www.programacalac.com

Facebook: @CALACplus

Twitter: @Calacplus

Calle José Gálvez N° 692 - Piso 7, Miraflores

Lima 15073 – Perú

Teléfono: +511 5005075

www.swisscontact.org

Es un Programa de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE

Ejecutado por:

swisscontact