



## MEDICIÓN DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS DE LOS BUSES EURO V+DPF – DIÉSEL, EURO VI – GNV Y OTROS ESTÁNDARES DE LA FLOTA DE TRANSMILENIO



 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE

  
swisscontact

*CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact*

## **Medición del número de partículas de los buses Euro V+DPF – Diésel, Euro VI – GNV y otros estándares de la flota de TransMilenio**

Documento elaborado en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 2) 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) antes de adoptar total o parcialmente contenidos de este documento directamente en instrumentos con validez jurídica.

### **INFORME FINAL**

Contrato de prestación de servicios No. 021-2021

Preparado para CALAC+

Universidad de Antioquia

Grupo de Manejo Eficiente de la Energía

Laboratorio de Máquinas Térmicas

Calle 67 No. 53-108. Bloque 19 1er. Piso Ala sur. Tel. (+574) 219 8547 Medellín - Colombia

Julio de 2021

Revisión febrero de 2022

### **Responsable**

Prof. Dr.-Ing. John Ramiro Agudelo Santamaría

Dpto. Ingeniería Mecánica Universidad de Antioquia

### **Investigadores de la Universidad de Antioquia**

Ing.-Dr. María Luisa Botero Vega, Profesora Dpto. Ingeniería Química

Ing.-Dr. Andrés Felipe Agudelo Santamaría, Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica

## Equipo Técnico

Jackeline Saldarriaga  
Carlos Mateo Vélez Rodríguez  
Javier David Londoño Echeverri

Piper Daneth Pimienta  
Julián Felipe Álvarez Morales

## Revisado por:

**Johanna Jiménez**  
Profesional del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**Deysi Rodríguez**  
Profesional Especializado de Gestión Ambiental de TRANSMILENIO S.A

**Jaime Rueda**  
Profesional de la Secretaría Distrital de Ambiente

**Adrián Montalvo**  
Director CALAC+

**Freddy Koch**  
Coordinador CALAC+ para el componente Transporte urbano menos contaminante

**Andrés Díaz**  
Coordinador CALAC+ para Colombia

Foto de la carátula: CALAC+, patio de TransMilenio, Bogotá – Colombia.

LOS TEXTOS PUEDEN SER MENCIONADOS TOTAL O PARCIALMENTE CITANDO LA FUENTE

## Contenido

1.	Resumen ejecutivo	8
2.	Introducción	12
3.	Antecedentes	13
3.1.	Material particulado emitido por vehículos y su impacto en la salud pública	13
3.2.	Marco normativo mundial y colombiano respecto a emisiones de material particulado en vehículos pesados	16
3.2.1.	Normas para homologación	16
3.2.2.	Inspección técnica periódica (ITP)	18
3.3.	Conteo de partículas en vehículos diésel para prueba ITP	19
3.3.1.	Grupo de trabajo NPTI - VERT	21
3.3.2.	TNO	22
3.3.3.	European Commission Joint Research Centre (JRC)	24
3.3.4.	Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)	26
3.3.5.	Swisscontact: CALAC y CALAC+	28
3.3.6.	Otros estudios técnicos y científicos de mediciones de PN en prueba ITP	29
3.4.	Sistema BRT de Bogotá: Transmilenio	30
4.	Metodología	32
4.1.	Caracterización de flota de buses estudiada	32
4.2.	Procedimiento de prueba de conteo de partículas y equipos de medición	35
4.3.	Procedimiento de la prueba	38
4.4.	Recolección y análisis estadístico de datos	41
5.	Resultado y Análisis	43
5.1.	Logística y procedimiento de medición	43
5.2.	Equipo de medición	45
5.3.	Emisión de PN	46
5.3.1.	Vehículos GNV	49
5.3.2.	Vehículos diésel con DPF	52
5.3.2.1.	Vehículos diésel con fallo en DPF	55
5.3.3.	Vehículos diésel sin DPF	59
5.3.4.	Impacto de límites de aprobación	62
6.	Conclusiones y Recomendaciones	65
7.	Referencias	68

## Contenido de Figuras

Figura 1. Muertes asociadas a la contaminación de aire urbano en Colombia en el año 2015. ....	14
Figura 2. Concentraciones promedio anuales de PM2.5 en 2017 para las estaciones de monitoreo de Colombia. La línea roja y azul indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual, la línea verde indica el límite que entrará a regir en 2030. ....	15
Figura 3. Clasificación del PM según su diámetro aerodinámico. ....	16
Figura 4. Evolución de la implementación de estándares de emisión de vehículos pesados en los principales mercados del mundo y Latinoamérica. ....	17
Figura 5. Evolución de la implementación de estándares de emisión de vehículos pesados en los principales mercados del mundo y Latinoamérica. ....	18
Figura 6. Línea de tiempo de investigaciones realizadas por TNO que conllevan a la propuesta de la nueva prueba PN-PTI adoptada por el gobierno de Holanda. ....	23
Figura 7. Emisión de PN en ralentí versus emisión de PN siguiendo el ciclo NEDC en pruebas de chasis dinamómetro de 3 vehículos diésel con DPF defectuoso. ....	23
Figura 8. Emisión de PN siguiendo el ciclo NEDC o WLTC en pruebas de chasis dinamómetro versus emisión de PN en ralentí caliente: (izquierda) vehículos diésel, (derecha) vehículos gasolina o gas natural. Los datos en ralentí se obtienen de dos formas: (PTI) con equipo de PN para prueba ITP; los demás en ciclo de conducción extrayendo los períodos de ralentí caliente con equipo PN-PEMS. ...	25
Figura 9. Emisión de PN siguiendo el ciclo de conducción del AMVA versus emisión de PN en ralentí caliente. ....	26
Figura 10. Resultados de aprobación de prueba PN-PTI de vehículos pesados en el AMVA durante el primer piloto de distintivo ambiental en 2019: (superior) porcentaje de aprobación y rechazo en diferentes modelos, (inferior) emisión de PN de vehículos que aprobaron la prueba según modelo. ....	27
Figura 11. Resultados de emisión de PN en prueba PN-PTI de vehículos pesados en el AMVA durante el segundo piloto de distintivo ambiental en 2020: (izquierda) todos los vehículos medidos, (derecha) vehículos con remediación. ....	28
Figura 12. Línea de tiempo de estudios y experiencias de Swisscontact, CALAC y CALAC+, en el conteo de partículas en Latinoamérica. ....	28
Figura 13. Emisión de PN en ralentí en vehículos diésel livianos de tecnologías Euro 5a,b y Euro 6 según su antigüedad (izquierda) y kilometraje (derecha). ....	30
Figura 14. Distribución de la flota de Transmilenio según tecnología vehicular y tipo de bus. Fuente de los datos: TRANSMILENIO S.A. Nota: Aquellos que están clasificados como Pre Euro IV son buses de los que no se conoce exactamente su tecnología, pero que se sabe que son anteriores a Euro IV. ....	31
Figura 15. Composición de la flota de Transmilenio según tecnología vehicular para la flota troncal y zonal. Fuente de los datos: TRANSMILENIO S.A. ....	31
Figura 16. Distribución de vehículos medidos según el tipo (biarticulado, articulado, padrón y busetón) y el combustible. El número sobre cada barra indica la cantidad total de buses y el porcentaje sobre el total, dentro de las barras indica la cantidad de cada tipo de bus. ....	32
Figura 17. Distribución de vehículos medidos según año modelo y tecnología vehicular. El número sobre cada barra indica la cantidad total de buses y el porcentaje sobre el total. ....	33

Figura 18. Caracterización de la flota de buses medida según: tecnología de emisión, marca, cilindrada y lugar de medición. ....	33
Figura 19. Procedimiento de medición de PN automatizado en el software del NPET. ....	35
Figura 20. Equipo NPET 3795 fabricado por TSI Inc.....	36
Figura 21. Dilutor eDiluter marca Dekati (izquierda), adaptación sonda del NPET (derecha). ....	37
Figura 22. Equipos auxiliares del dilutor: sistema de filtros y secado (izquierda) y compresor de aire (derecha). ....	37
Figura 23. Medición de la temperatura del cárter en la parte trasera del bus (izquierda), debajo del bus (centro), en el tablero del bus (derecha). ....	39
Figura 24. Procedimiento de medición de PN en buses de Transmilenio en Bogotá. ....	40
Figura 25. Diagrama del almacenamiento y tratamiento de datos durante la campaña de mediciones. ....	42
Figura 26. Descripción de información estadística presentada en los diagramas de cajas y bigotes. ....	42
Figura 27. Imágenes de medición fija en cárcamo de mantenimiento de buses. ....	43
Figura 28. Imágenes de medición móvil en buses parqueados. ....	44
Figura 29. Preparación y mantenimiento del NPET durante jornadas de medición.....	45
Figura 30. Preparación y mantenimiento general del NPET. ....	46
Figura 31. Emisión de PN para todos los buses medidos según el estándar de emisiones que cumplen. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al <i>zoom</i> de las tecnologías de bajas emisiones de PM. ....	47
Figura 32. Emisión de PN para todos los buses medidos según combustible que utiliza. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al <i>zoom</i> de las tecnologías de bajas emisiones de PM. ....	48
Figura 33. Imágenes del patio 10 a las afueras de la ciudad. ....	48
Figura 34. Emisión de PN buses Euro VI a GNV según año de fabricación. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada año modelo. ....	50
Figura 35. Emisión de PN buses Euro VI a GNV según kilometraje recorrido. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para los kilometrajes más representativos. ....	51
Figura 36. Emisión de PN buses Euro VI a GNV en cada zona de medición. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al <i>zoom</i> de emisión PN medido para cada patio. ....	51
Figura 37. Emisión de PN buses Euro VI a GNV según cilindrada, diferenciado entre tipo de bus: articulado, biarticulado y padrón. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada cilindrada. ....	52
Figura 38. Emisión de PN buses diésel con DPF según año de fabricación, discriminado por tecnología Euro V y Euro VI. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada año modelo. ....	53
Figura 39. Emisión de PN buses diésel con DPF según kilometraje recorrido, discriminado en Euro V y Euro VI. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para los kilometrajes más representativos. ....	54

Figura 40. Emisión de PN buses diésel con DPF según cilindrada, diferenciado entre tipo de bus: articulado, bi-articulado y padrón. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada cilindrada. ....	54
Figura 41. Emisión de PN buses diésel DPF en cada zona de medición. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al rango total de emisión PN medido para cada patio. ....	55
Figura 42. Distribución de vehículos con DPF según su emisión de PN. El número azul corresponde a la cantidad de buses, y el verde al porcentaje del total. ....	56
Figura 43. Emisión de PN buses diésel DPF al ralentí bajo y ralentí alto. ....	58
Figura 44. Emisión de PN buses diésel sin DPF según año de fabricación, discriminado por tecnología Euro II, III, IV y V.....	60
Figura 45. Emisión de PN buses diésel sin DPF según kilometraje recorrido, discriminado por tecnología Euro II, III, IV y V. ....	60
Figura 46. Comparación de emisión de PN en buses sin DPF: Transmilenio y medidos por VERT [34]. El valor de la barra verde corresponde a la mediana y la barra de error al tercer y primer cuartil. ..	61
Figura 47. Emisión de PN buses diésel sin DPF según cilindrada, discriminado por tecnología Euro II, III, IV y V.....	61
Figura 48. Emisión de PN buses diésel sin DPF en cada zona de medición. El gráfico insertado corresponde al <i>zoom</i> de emisión PN medido para cada patio. ....	62
Figura 49. Impacto del límite de aprobación en vehículos diésel con DPF (Euro V y Euro VI) y vehículos Euro VI a GNV. ....	63
Figura 50. Impacto del límite de aprobación en vehículos diésel sin DPF. ....	64

## Contenido de Tablas

Tabla 1. Comparación de requerimientos de la prueba PN-PTI y del equipo de medición en diferentes países. Adaptado de [17].....	20
Tabla 2. Límites de emisión de PN para detectar fallos en motor y sistema de postratamiento (específicamente DPF) según tipo de vehículo sugeridos por VERT [17] .....	22
Tabla 3. Descripción de sistemas de postratamiento de los buses medidos según la tecnología de emisiones .....	34
Tabla 4. Especificaciones contador de partículas .....	36
Tabla 5. Especificaciones Dilutor .....	37
Tabla 6. Estimación del factor de dilución para corrección de mediciones de PN .....	41
Tabla 7. Concentración de PN en el ambiente en las diferentes zonas de medición .....	49
Tabla 8. Listado de buses Euro VI a GNV con emisión de PN mayor a 10.000 #/cm <sup>3</sup> .....	50
Tabla 9. Listado de buses diésel con DPF con emisión de PN mayor a 250.000 #/cm <sup>3</sup> .....	56
Tabla 10. Buses Euro V con DPF averiado según patio de operación .....	58
Tabla 11. Porcentaje de aprobación de buses con tecnologías de bajas emisiones de PN con diferentes límites de emisión.....	63
Tabla 12. Porcentaje de aprobación de buses con tecnologías de alta emisión de PN con diferentes límites de emisión.....	64

## Glosario

- **Ralentí bajo (low idle):** motor operando en régimen de giro de marcha mínima (neutra o punto muerto).
- **Ralentí alto (high idle):** condición de operación de un motor a velocidad constante sin carga a un porcentaje de la velocidad de gobernación .
- **Prueba de homologación:** verificación de límites estandarizados de factores de emisión aplicable a vehículos nuevos. Si son livianos, inferiores a 3.500 kg de peso bruto vehicular, se expresan en g/km, si son vehículos pesados, PBV > 3500 kg, se expresan en g/kWh.
- **Prueba de inspección técnica periódica (ITP):** verificación de límites estandarizados de emisiones para vehículos en uso. Para el caso nacional, si son motores de encendido provocado sólo se regula concentración de emisiones gaseosas; si se trata de motores diésel, sólo se regula opacidad de humo en aceleración libre.
- **Prueba de aceleración libre:** se mide la cantidad de luz extinguida por las emisiones de humo en el gas de escape del vehículo durante ciclos de aceleración súbita. Generalmente se cuantifica y reporta la emisión de humo de escape en unidades de opacidad de humo, N, o densidad de humo, K (coeficiente de absorción de luz).
- **DOC:** catalizador de oxidación para motores diésel. Actúa oxidando el monóxido de carbono y los hidrocarburos no quemados.
- **SCR:** sistema de reducción catalítica selectiva para NO<sub>x</sub>, los reduce a N<sub>2</sub>. Además, requiere la adición de un fluido adicional, normalmente úrea automotriz.
- **Retrofitting (re-equipamiento):** Aplica a la instalación de DPFs por parte de terceros, a vehículos que en su comercialización original o nueva no venía equipado con estos sistemas de control de emisiones.
- **DPF:** filtro de partículas diésel, por sus siglas en inglés.

## 1. Resumen ejecutivo

El programa CALAC+, ejecutado por Swisscontact y financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), busca brindar apoyo en la implementación de medidas para reducir emisiones de hollín, contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero en el transporte urbano y maquinaria de construcción, en cuatro países de América Latina, Chile, Colombia, México y Perú. En la ciudad de Bogotá el programa se realiza en cooperación técnica con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), TransMilenio y la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA). Por lo anterior, la Universidad de Antioquia ha sido contratada (contrato No. 021-2021) para la “Medición del número de partículas de los buses Euro V+DPF – Diésel, Euro VI – GNV y otros estándares de la flota de TransMilenio”.

El contrato de prestación de servicios No. 021-2021 tuvo como alcance: *contribuir con la generación de una línea base de concentración de partículas sólidas en los buses de TransMilenio, que les permita a las autoridades locales avanzar en los siguientes 5 ámbitos.* A continuación, se presentan un resumen de los resultados obtenidos en cada uno de los ámbitos establecidos en el contrato:

- I. Diagnosticar el estado actual de los buses Euro V+DPF – Diésel y Euro VI – GNV según su nivel de emisión de partículas sólidas.

	Total medidos	PN (#/cm <sup>3</sup> x 1000)				Modelos	Kilometraje promedio
		< 5	>5 y <250	>250	>1000		
<b>Euro V + DPF</b>	660	430 (65%)	191 (29%)	32 (5%)	7 (1%)	2019-2021	143.011
<b>Euro VI Diésel</b>	66	61 (92%)	4 (7%)	1 (1%)	-	2020-2021	22.924
<b>Euro VI GNV</b>	631	618 (98%)	13 (2%)	-	-	2019-2021	119.413
<b>Total</b>	1357	1109 (82%)	208 (15%)	33 (2.5%)	7 (0.5%)	2019-2021	126.198

- II. Identificar posibles desperfectos en la flota de buses Euro V+DPF – Diésel y Euro VI – GNV con respecto a su nivel de emisión.

Para detectar un vehículo diésel con DPF defectuoso las recomendaciones de estudios europeos sugieren un límite inferior de emisión de PN de 250.000 #/cm<sup>3</sup> y la normatividad holandesa definió el límite de 1.000.000 #/cm<sup>3</sup>.

En este proyecto se realizaron pruebas adicionales en ralentí alto a 20 buses. Se encontró que el 50% de estos buses emitían más de 250.000 #/cm<sup>3</sup> en ralentí alto, indicando

deficiencia de la remoción de partículas del DPF. Por otro lado, los resultados indican que los buses que emitieron entre 25.000 y 100.000  $\#/cm^3$  en ralentí bajo podrían requerir mantenimiento, por lo que ameritan la revisión del DPF; para los buses que emitieron entre 100.000 y 250.000  $\#/cm^3$  en ralentí bajo, es altamente probable que presenten fallos en el DPF, o que el monolito cerámico del DPF haya sido fabricado con poros de tamaño grande (en la actualidad los DPF se fabrican con tamaños de poro sustancialmente pequeños).

El diagnóstico anterior está basado en la recomendación de la Asociación VERT que propuso un límite de 50.000  $\#/cm^3$  para determinar si un filtro requiere mantenimiento, el 67% de los buses con DPF medidos en este proyecto presentaron emisiones inferiores a 5000  $\#/cm^3$ , lo que respalda la capacidad de reducción de emisión de PN de un DPF en buen funcionamiento. Es importante tener en cuenta que valores de número de partículas inferiores a 250.000  $\#/cm^3$  corren el riesgo de estar fuera del valor sugerido por el Joint Research Centre (JRC) al comparar las emisiones de PN reguladas para vehículos Euro 6 bajo ciclo de conducción de homologación versus las registradas en ralentí bajo con motor caliente.

	Total medidos	PN ( $\#/cm^3 \times 1000$ ) en ralentí bajo			
		DPF con fallo		DPF con posible fallo <sup>3</sup>	
		>1.000 <sup>1</sup>	>250 <sup>2</sup>	100 - 250	25 - 100
<b>Euro V (DPF adaptado)</b>	660	7 (1%)	39 (6%)	38 (6%)	65 (10%)
<b>Euro VI (DPF fábrica)</b>	66	-	1 (1%)	1 (1%)	-

<sup>1</sup> Según límites de la regulación de Países Bajos

<sup>2</sup> Según Guía No.1 de Calac+ y estudios técnicos en Europa

<sup>3</sup> Según pruebas de este proyecto.

La emisión de vehículos EURO VI a GNV siempre fue significativamente inferior a todos los límites evaluados. El 98% de estos buses presenta una emisión inferior a 5000  $\#/cm^3$ . Existen estudios técnicos y científicos que reportan que la mayoría del material particulado emitido por este tipo de buses tienen un diámetro inferior a 23 nm, además con elevado contenido de material semivolátil. El equipo de medición utilizado en estas pruebas tiene un rango de medición de 23 a 1000 nm, coherente con el punto de corte descrito en la *Guía técnica para la inspección técnica periódica (ITP) de vehículos provistos con filtros de partículas diésel basado en el conteo de partículas* [33], e incluye la remoción de material volátil, por lo cual no es ideal para evaluar las emisiones de vehículos GNV Euro VI. Para este tipo de vehículos se recomienda explorar medición de concentración de partículas <23nm, y que incluya material semivolátil.

- III. Generar experiencia en la medición de número de partículas, para la formulación o adopción de un protocolo de medición basado en este parámetro.

Se utilizó un NPET 3795 marca TSI para las mediciones de PN. Este equipo mide la concentración de partículas de hollín en el tubo de escape en el rango de 23 a 1000 nm de tamaño, es decir el número de partículas en 1 centímetro cúbico ( $\#/cm^3$ ). El principio de medición es de conteo por condensación (CPC) con remoción de volátiles, donde se cuentan una a una y directamente las partículas muestreadas del tubo de escape, independientemente de su tamaño.

Éste es un equipo confiable, robusto y portátil y de fácil uso. Se creó un Instructivo para medición de número de partículas, que incluye los métodos de medición y requerimientos del sitio de mediciones, la preparación del equipo antes y durante la jornada de medición y su mantenimiento general, además de otros aspectos técnicos según el tipo de vehículo a ser medido.

Se realizó la medición de PN en 11 patios de Transmilenio, 8 patios troncales y 3 zonales. Se alcanzó una frecuencia de medición de hasta 1 vehículo cada 2 minutos, con dos personas realizando el procedimiento de medición. Esta frecuencia depende de que haya un flujo constante y continuo de vehículos en el punto de medición.

- IV. Diseñar una regulación de inspección técnica periódica que permita el control adecuado de las emisiones de vehículos con DPF y con estándares de emisiones Euro VI, tomando en consideración que la medición de opacidad es inadecuada para fuentes móviles con estos niveles tecnológicos.

Se realizó la prueba de emisión de PN al ralentí siguiendo el procedimiento establecido en la *Guía técnica para la inspección técnica periódica (ITP) de vehículos provistos con filtros de partículas diésel basado en el conteo de partículas*, desarrollada por CALAC+.

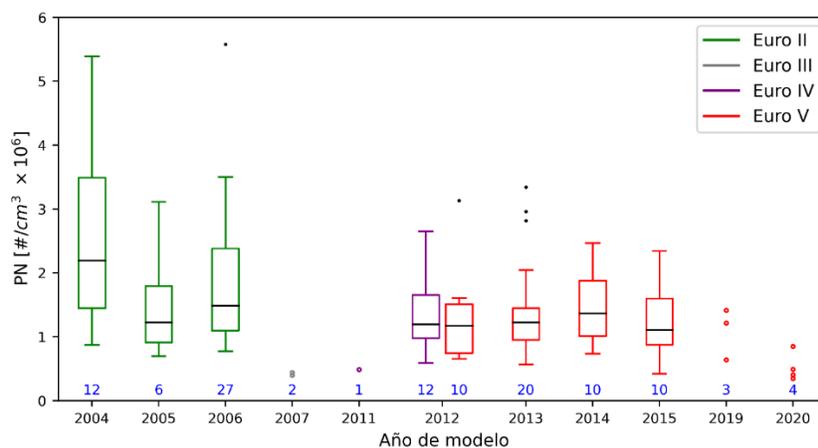
Se recomienda ampliar el rango de medición a partículas de tamaño menor a 23 nm para vehículos a GNV. La literatura científica y la experiencia técnica internacional refieren que las emisiones de PN pueden ser significativamente altas para partículas con un tamaño menor a 23 nm; el equipo utilizado tiene un rango de medición en términos de tamaño de partícula de 23-1000 nm, por lo que no logra mostrar la contribución de las partículas que tienen un tamaño menor a 23 nm.

Las pruebas adicionales realizadas a 20 buses revelaron que el 50% de estos superan el límite de 250.000  $\#/cm^3$  en ralentí alto, por esto se recomienda incluir una etapa adicional de ralentí alto en el protocolo para medición que permita detectar buses que, aunque están por debajo del límite de 250.000  $\#/cm^3$ , podrían presentar fallos en el DPF y requieren mantenimiento. Además, se sugiere explorar valores límite inferiores de emisión de PN en ralentí bajo, como 70.000 o 100.000  $\#/cm^3$ , para detectar fallos en vehículos con DPF y sugerir su mantenimiento. Se recomienda evaluar un procedimiento de prueba adaptado como se presenta en el siguiente diagrama:



- V. Tener información sobre el desempeño ambiental en términos de número de partículas sólidas de vehículos pesados que tengan estándares anteriores a Euro V+DPF – Diésel y Euro VI – GNV, con el fin de poder utilizarla como insumo para los beneficios contemplados en el esquema de etiquetado ambiental vehicular.

	Total medidos	PN (#/cm <sup>3</sup> x 1000)			Modelos	Kilometraje promedio
		< 5	>250	>1000		
Euro II	45	-	45	37 (82%)	2004-2006	347.771
Euro III	2	-	2	-	2007	1.256.523
Euro IV	13	-	13	9 (69%)	2011-2012	781.964
Euro V	57	-	57	36 (63%)	2012-2020	618.266
<b>Total</b>	<b>117</b>	<b>-</b>	<b>117</b>	<b>82 (70%)</b>	<b>2004-2020</b>	<b>543.328</b>



## 2. Introducción

Entre los años 2013 y 2015 se consolida el programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina (CALAC) ejecutado por Swisscontact y financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), siendo su finalidad fomentar la eficacia y rapidez en la reducción de contaminantes perjudiciales para la salud humana y mitigar el cambio climático mediante la implementación de filtros de partículas de motores diésel [1]. En su duración, el programa propuso tres ejes de acción, dos de ellos enfocados en la reducción de emisiones de partículas ultrafinas y carbón negro en los sistemas de transporte público integrado tanto de Santiago de Chile (Transantiago) como de Bogotá (Transmilenio), y un tercero consistente en la formación de una alianza de ciudades que promoviera acciones rápidas para mitigar el cambio climático y la contaminación del aire.

En 2018, se dio continuación al programa con la introducción de CALAC+. Trabajando de acuerdo a algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, el programa busca brindar apoyo en la implementación de medidas para reducir emisiones de hollín, contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero en el transporte urbano y maquinaria de la construcción, en las ciudades de Bogotá, Ciudad de México, Lima y Santiago de Chile. Una de sus líneas de acción llamada *Buses Libres de Hollín y Bajos en Emisiones de Carbono*, busca asegurar que las emisiones de partículas ultrafinas, carbono negro y gases de efecto invernadero (GEI) de los sistemas de transporte público urbano se reduzcan de manera significativa y sostenible. Para ello, se ofrece asistencia técnica y apoyo para mejorar los marcos legales, las regulaciones ambientales y de transporte (a nivel municipal y nacional), la planificación de inversiones y el desarrollo de capacidades institucionales creando condiciones propicias para el establecimiento de tecnologías libres de hollín y bajas en emisiones de carbono.

En 2020, CALAC+ publicó el estudio de *Fiscalización y control de la flota vehicular Euro V y Euro VI para Colombia* [2]. Este estudio incluyó, entre otros, la exploración de la prueba de conteo de partículas para la inspección técnica periódica (ITP) de buses de Transmilenio en Bogotá. Entre las recomendaciones realizadas está: “[...] acumular información de campo, con mediciones de PN en vehículos diésel y a gasolina, para generar antecedentes que permitan elaborar un límite máximo de emisiones conforme a las condiciones de la flota [...]” [2].

En este contexto, CALAC+ solicita la realización del presente estudio que tiene como objetivo y alcance los siguientes:

## Objetivo

Realizar una evaluación de línea base de emisiones de número de partículas sólidas de la flota de buses (Euro V+DPF – Diésel, Euro VI – GNV, Euro IV, Euro III, Euro II, entre otros) del Sistema TransMilenio.

## Alcance

Contribuir con la generación de una línea base de concentración de partículas sólidas en los buses de TransMilenio, que les permita a las autoridades nacionales o locales, según corresponda:

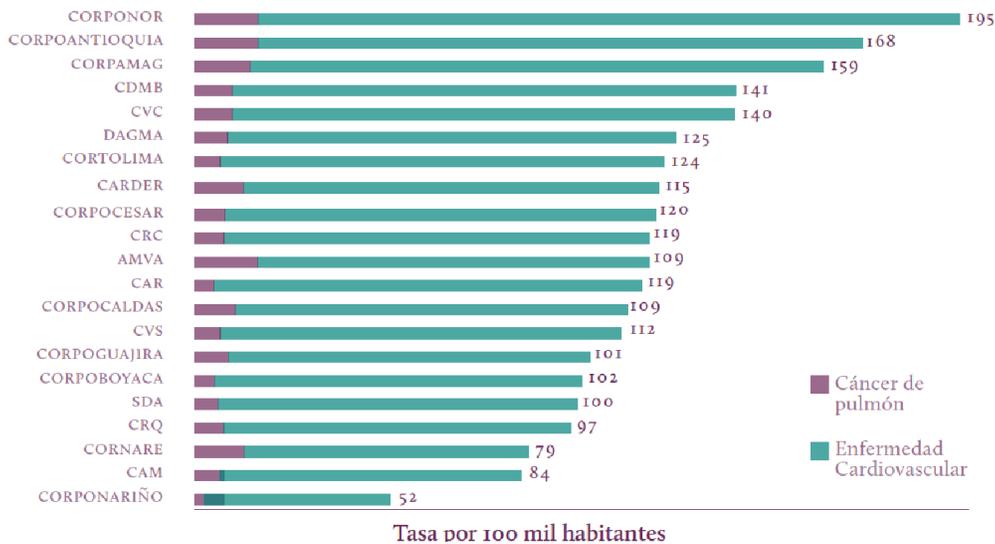
- I. Diagnosticar el estado actual de los buses Euro V+DPF – Diésel y Euro VI – GNV según su nivel de emisión de partículas sólidas.
- II. Identificar posibles desperfectos en la flota de buses Euro V+DPF – Diésel y Euro VI – GNV con respecto a su nivel de emisión.
- III. Generar experiencia en la medición de número de partículas, para la formulación o adopción de un protocolo de medición basado en este parámetro.
- IV. Diseñar una regulación de inspección técnica periódica que permita el control adecuado de las emisiones de vehículos con DPF y con estándares de emisiones Euro VI, tomando en consideración que la medición de opacidad es inadecuada para fuentes móviles con estos niveles tecnológicos.
- V. Tener información sobre el desempeño ambiental en términos de número de partículas sólidas de vehículos pesados que tengan estándares anteriores a Euro V+DPF – Diésel y Euro VI – GNV, con el fin de poder utilizarla como insumo para los beneficios contemplados en el esquema de etiquetado ambiental vehicular.

## 3. Antecedentes

### 3.1. Material particulado emitido por vehículos y su impacto en la salud pública

La emisión de contaminantes atmosféricos proveniente de vehículos representa un gran desafío para los grandes centros urbanos, debido a su impacto negativo en la calidad del aire y el consiguiente riesgo para la salud humana. Las emisiones de gases de escape de los motores diésel fueron clasificadas como carcinógenas por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) en 2012 [3]. Tanto los contaminantes gaseosos del aire (ozono, azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles) como el material particulado (PM) en suspensión, causan efectos adversos sobre la salud. Sin embargo, los efectos más graves están relacionados con el PM, que incluyen la muerte prematura, síntomas respiratorios, daño en la función pulmonar y enfermedades cardiovasculares [4], [5].

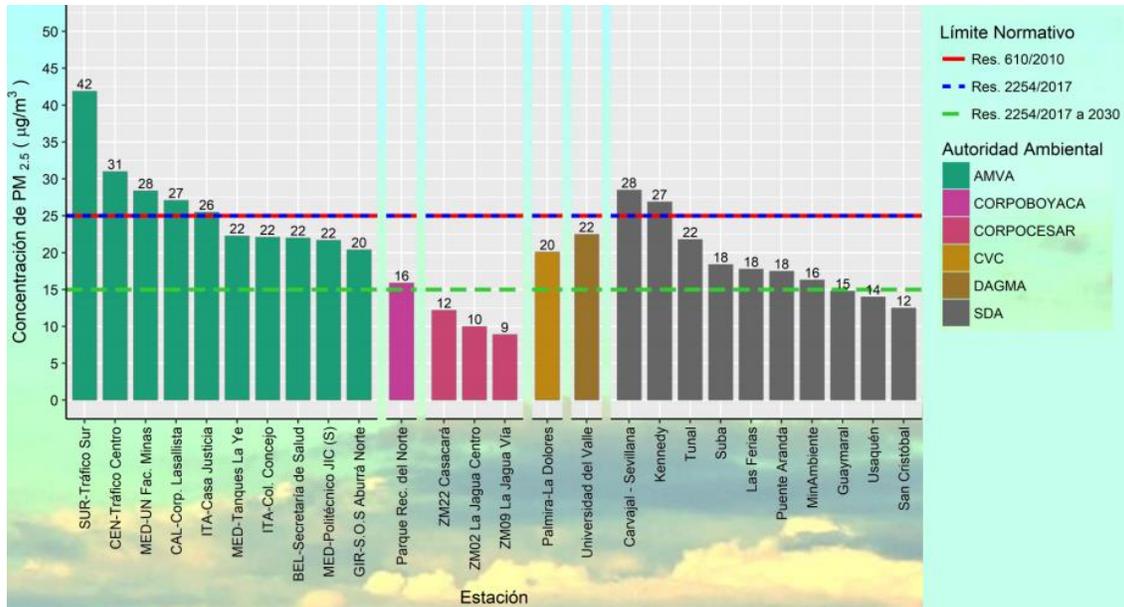
En el 2018 el Departamento de Planeación Nacional de Colombia (DNP) presentó por primera vez una valoración económica de la degradación ambiental evaluada en el año 2015 [6]. Esta valoración incluye el impacto de la contaminación del aire urbano en la morbilidad y mortalidad en el país, así como el costo económico asociado. Este informe muestra cifras alarmantes de muertes asociadas a la contaminación del aire urbano (ver **Figura 1**). Se estimó que, en el año 2015, 10.527 muertes y 67.8 millones de síntomas y enfermedades pudieron estar asociados al fenómeno de contaminación atmosférica, con costos asociados de hasta \$15.4 billones de pesos (cerca del 2.6% del PIB).



Fuente: DNP 2018 [6]

**Figura 1.** Muertes asociadas a la contaminación de aire urbano en Colombia en el año 2015.

El principal contaminante del aire urbano en Colombia con incidencia en la salud es el PM. En un informe reciente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) sobre el estado de la calidad del aire en Colombia [7], se encontraron niveles promedio de material particulado PM2.5 (partículas menores a 2.5 micras) por encima de los límites establecidos por las normas nacionales, como se muestra en la **Figura 2**.

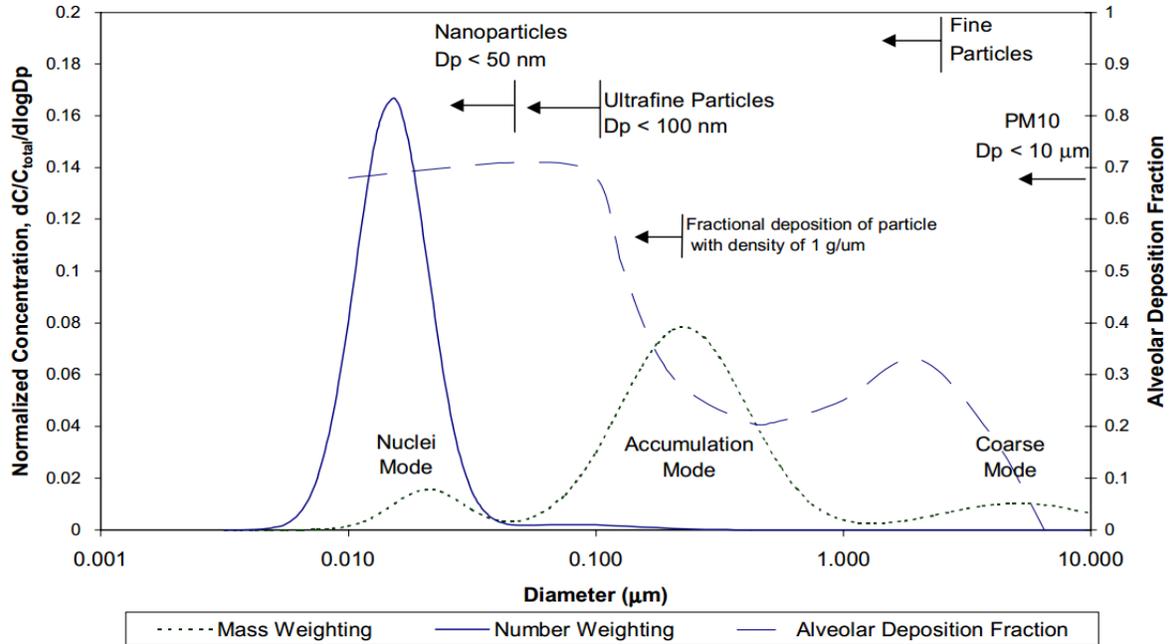


Fuente: IDEAM 2018 [7]

**Figura 2.** Concentraciones promedio anuales de PM<sub>2.5</sub> en 2017 para las estaciones de monitoreo de Colombia. La línea roja y azul indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual, la línea verde indica el límite que entrará a regir en 2030.

El PM se puede clasificar en diferentes categorías de acuerdo a su tamaño aerodinámico (ver **Figura 3**): i) Partículas grandes (>10 micras), ii) PM<sub>10</sub> (≤ 10 micras), iii) Partículas finas o PM<sub>2.5</sub> (≤ 2.5 micras), iv) Partículas ultra-finas o PM<sub>0.1</sub> (≤ 100 nanómetros); y v) Nanopartículas (< 50nm) [8]. El 100% del PM emitido por los motores tanto a diésel como a gasolina y gas natural es de tamaño inferior a 1 micra, mientras que el 95% es menor a 300 nanómetros. En vista de lo anterior, todo el material particulado emitido por vehículos será PM<sub>2.5</sub>. Las partículas más pequeñas están presentes en grandes cantidades, pero contribuyen poco a la masa total del PM, por esta razón la norma de emisiones Euro VI/6 para homologación de vehículos diésel impone un límite a la emisión de PM peso (g/kW-h o g/km) y adicionalmente en número de partículas (#/kW-h o #/km).

La toxicidad del PM<sub>2.5</sub> está ligada a su composición química y a su distribución de tamaños. El PM consiste de un núcleo de hollín que adsorbe en su superficie hidrocarburos no quemados, compuestos policíclicos aromáticos (PAH), compuestos orgánicos volátiles (VOC), ácido sulfúrico (dependiendo del contenido de azufre del combustible) y metales de transición. El PM actúa como medio de transporte para estas moléculas tóxicas, y su capacidad de penetración y deposición en el sistema respiratorio depende de su tamaño. Las partículas de menor tamaño pueden ser respiradas con mayor facilidad y ser transportadas en el organismo a niveles más profundos [9].



Fuente: Kittelson 1998 [8]

Figura 3. Clasificación del PM según su diámetro aerodinámico.

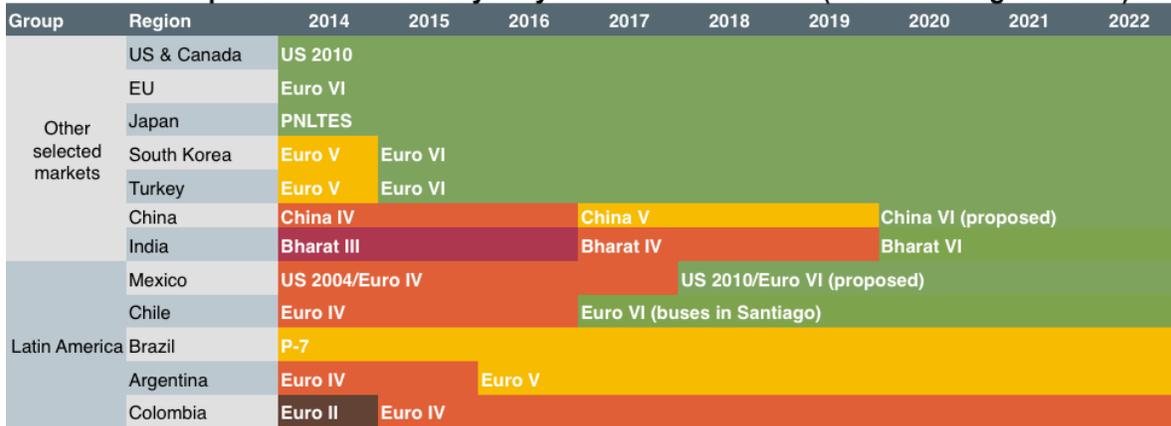
## 3.2. Marco normativo mundial y colombiano respecto a emisiones de material particulado en vehículos pesados

### 3.2.1. Normas para homologación

El sistema de homologación describe el proceso por medio del cual se certifica que un modelo de un vehículo cumple con todos los requisitos de seguridad, ambientales y de conformidad de producción antes de autorizar su comercialización. Las normas para homologación (o type-approval) determinan los requisitos para la importación, venta y uso de vehículos de motor. Respecto a las emisiones de los vehículos, se exige su medición en un laboratorio siguiendo un ciclo de prueba en un dinamómetro de chasis, o más recientemente, en condiciones reales de conducción.

En el mundo existen principalmente tres estándares de emisión para buses y camiones: Europa (Euro), Estados Unidos (EPA) y Japón. Estos estándares regulan los niveles de emisión de contaminantes del aire. La **Figura 4** muestra la evolución de la implementación de estos estándares en los principales mercados del mundo y en Latinoamérica, en su equivalente a la norma Euro. En Colombia, a partir del 2023, todos los vehículos nuevos deberán cumplir con la norma Euro VI.

**Timeline for adopted nationwide heavy-duty emissions standards (all sales & registrations)**



**Euro-equivalent**



Fuente: ICCT 2017 [10]

**Figura 4.** Evolución de la implementación de estándares de emisión de vehículos pesados en los principales mercados del mundo y Latinoamérica.

La evolución de las normas de emisiones conlleva a la introducción de límites más estrictos, todo con el propósito de disminuir los efectos causados por los contaminantes emitidos en el medio ambiente y en la salud. En la **Figura 5**, se muestra cómo han disminuido los límites de emisión de NOx y PM para vehículos pesados. En 2014 con el inicio de Euro 6/VI, se introdujo además un límite para la emisión de número de partículas (PN) en vehículos diésel, lo que forzó a los fabricantes a incorporar filtros de partículas diésel (DPF). Estos filtros tienen la capacidad de reducir drásticamente las emisiones de partículas tanto en masa como en número. Además, la concentración de PN en los gases de escape no diluidos, con el motor a velocidad de ralentí, puede estar por debajo de la concentración en el aire ambiente.

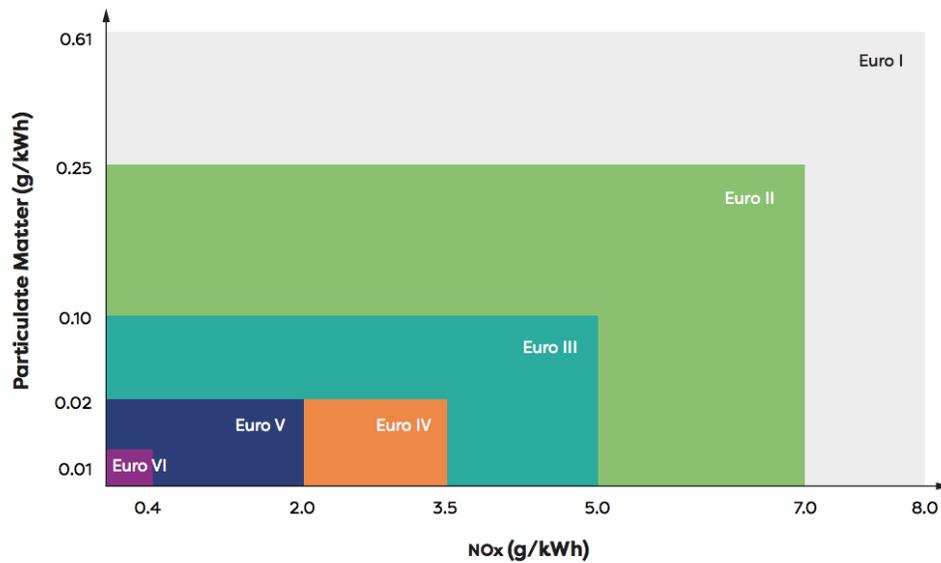
Colombia

La Resolución ministerial 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS), modificada por la Resolución 1111 de 2013 del MADS, reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres y la certificación de las emisiones. Las normas para las emisiones vehiculares se basan en las regulaciones europeas y de Estados Unidos, y en general permiten el cumplimiento de cualquiera de los programas regulatorios.

A su vez, la Resolución 2604 de 2009 de los Ministerios de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, establece límites máximos permisibles de emisión en prueba dinámica, exclusivamente para los vehículos que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte terrestre de pasajeros y para motocarros que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte terrestre automotor mixto, entre otras disposiciones. La ciudad de Bogotá, a través de la resolución 1304 de 2012, exige

límites de emisión más estrictos para la flota de vehículos de transporte público, equivalentes al estándar Euro V.

Adicionalmente, la Ley 1972 de 2019 señala que, a partir del 1 de enero de 2023, las fuentes móviles con motor ciclo diésel que se fabriquen, ensamblen o importen al país deben cumplir con los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes al aire correspondientes a tecnologías Euro VI.



Fuente: AECC [11]

**Figura 5.** Evolución de la implementación de estándares de emisión de vehículos pesados en los principales mercados del mundo y Latinoamérica.

### 3.2.2. Inspección técnica periódica (ITP)

Existe gran diferencia entre las emisiones medidas para la prueba de homologación cuando el vehículo es nuevo, y las emisiones reales de un vehículo en uso a medida que envejece. Para esto, los países definen pruebas de inspección periódicas que intenten dar cuenta del estado de mantenimiento del vehículo a partir de ciertos años de uso o de haber superado cierto kilometraje, de manera que sea posible conocer su estado de mantenimiento. Estas pruebas son menos exigentes que las pruebas homologación, y no requieren el uso de equipos sofisticados como los medidores portátiles para prueba en carretera (PEMS).

El actual reglamento internacional para el control periódico de las emisiones de PM de los vehículos diésel de carretera en uso se basa en la prueba de opacidad en aceleración libre sin carga. En esta prueba se mide la cantidad de luz extinguida por las emisiones de humo en el gas de escape del vehículo, usando un opacímetro. Generalmente se cuantifica y reporta la emisión de humo de escape en unidades de opacidad de humo (N en %), o densidad de humo (K en  $m^{-1}$ , también llamada coeficiente de absorción de luz). La opacidad de humo es función de la Longitud de Trayectoria Óptica Efectiva (LTOE), la cual es específica del opacímetro. La prueba consiste en la realización de tres ciclos de aceleración súbita hasta

alcanzar la velocidad de giro gobernada del vehículo y regreso a velocidad mínima con el motor en ralentí. En cada ciclo de aceleración se mide la densidad de humo, y dependiendo de la normatividad de cada país, se reporta ese valor o se calcula el porcentaje de opacidad.

### Colombia

En Colombia la prueba ITP es denominada revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes. La Resolución 910 de 2008 define (no densidad de humo, como es lo frecuente en otras regulaciones internacionales), en términos del porcentaje de opacidad, los límites máximos permisibles para vehículos con motor diésel en aceleración libre, en la cual se incluyen desde vehículos modelo 1970 y anteriores hasta vehículos 2010 y posteriores. En Colombia los centros de diagnóstico autorizados (CDA) realizan la prueba de opacidad regulada para vehículos diésel con opacímetros de flujo parcial, los cuales tienen LTOE normalmente de 200, 215 y 430 mm.

En el marco del proyecto FEVA II (Factores de emisión de fuentes móviles del Valle de Aburrá) de 2019, en alianza de la Universidad de Antioquia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se identificó que la medición de opacidad es inapropiada para el control efectivo de las emisiones de material particulado [12].

### **3.3. Conteo de partículas en vehículos diésel para prueba ITP**

La prueba de opacidad del humo para vehículos diésel actual tiene una baja correlación con la emisión de PM (masa)/PN (número) del vehículo [12], [13]. La mayoría de los vehículos diésel pueden incluso pasar esta prueba sin tener DPF. Por lo tanto, la prueba no detecta la extracción o falla del DPF [14]. La reducción del valor límite no es una opción, ya que los opacímetros usados en la prueba de opacidad para ITP tienen una precisión de  $\pm 0.30 \text{ m}^{-1}$  y las emisiones de humo de este tipo de vehículos suele estar por debajo de  $0.05 \text{ m}^{-1}$  [13]. Además, por el principio de medición, las partículas menores a 200 nm no son detectadas apropiadamente por el opacímetro, limitando la sensibilidad a partículas pequeñas pero presentes en gran número [15].

La introducción de regulaciones más estrictas para la homologación de vehículos diésel, que ha obligado al uso de DPF, ha logrado reducciones de hasta el 99.99% de las emisiones de PM en los gases de escape. Esto implica también la reevaluación de las pruebas de ITP que permitan detectar, dentro de estas emisiones tan bajas, anomalías. Los DPF pueden dañarse, bloquearse y en algunos casos retirarse de forma ilegal para aumentar la potencia del vehículo. En esos casos, el vehículo puede emitir una cantidad mayor de partículas, incluso varios ordenes de magnitud mayores que con el DPF en buen estado, lo cual tiene un efecto negativo en la calidad del aire y la salud humana.

Las emisiones de PN de vehículos diésel equipados con DPF con el motor sin carga y en régimen de giro mínimo (ralentí bajo) son usualmente menores a  $5.000 \text{ \#/cm}^3$  y menores que la concentración de PN en el ambiente. Por esto, defectos en los DPF se pueden detectar fácilmente ya que la emisión de PN sería más alta que su concentración en el aire ambiente

[16]. Desde 2017 existe una prueba ITP basada en la emisión del número de partículas (PN-PTI) en maquinaria de construcción y barcos en Suiza con el motor sin carga y a máximo régimen de giro gobernado (ralentí alto). En 2016, varias organizaciones gubernamentales, institutos metrológicos, científicos y fabricantes de equipos suizos, alemanes y holandeses reconocieron la necesidad de una nueva prueba de emisión de partículas, y se estableció un grupo de trabajo técnico informal (NPTI), a través de la asociación VERT y diferentes organizaciones de los Países Bajos.

**Tabla 1. Comparación de requerimientos de la prueba PN-PTI y del equipo de medición en diferentes países. Adaptado de [17]**

	Suiza	Holanda	Alemania	VERT
Regulación	SR 941.210	IENW/BSK-2020/125046	PTB-A 12.16	Recomendación 2021 [17]
<b><i>Sobre la prueba</i></b>				
Tipo vehículos	Maquinaria con DPF	Euro 4-6 con DPF	Euro 6/VI	Motores combustión interna
Límite aprobación (#/cm <sup>3</sup> )	2.5 x 10 <sup>5</sup>	1 x 10 <sup>6</sup>	2.5 x10 <sup>5</sup>	5 x 10 <sup>4</sup>
Aprobación rápida (#/cm <sup>3</sup> )	-	-	50.000	5 x 10 <sup>4</sup>
Combustible	Diésel	Diésel	Diésel	Hidrocarburos
Tipo de prueba (ralentí)	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Duración muestreo (s)	3 x 5	15	3 x 35	3 x 15
PN Zero diario	-	Si	Si	Si
PN ambiente diario	-	-	opcional	Si
<b><i>Sobre el equipo de medición</i></b>				
Rango de PN (#/cm <sup>3</sup> )	5 x10 <sup>4</sup> - 5 x10 <sup>6</sup>	5 x10 <sup>3</sup> - 5 x10 <sup>6</sup>	5 x10 <sup>3</sup> - 5 x10 <sup>6</sup>	3 x10 <sup>3</sup> – 1.5 x10 <sup>6</sup>
Error max. Homologación (% @(#/cm <sup>3</sup> ))	-	25 @25.000	25 @5.000	25 @5.000
Error max. Calibración anual (% @(#/cm <sup>3</sup> ))	-	25 @25.000	75 @10.000	50 @10.000
Rango de tamaño de partícula (nm)	23 – 300	23 – 200	23 – 200	23 – 200
Eficiencia de conteo (%)				
@ 23 nm				
@ 50 nm	< 50	20 – 60	20 – 60	20 – 60
@ 80 nm	-	60 – 130	60 – 130	60 – 130
@ 200 nm	70 – 130	70 – 130	-	70 – 130
	< 300	-	50 – 200	< 200
Eficiencia VPR (%)	> 95	> 95	> 90	> 95

En enero del 2021 el gobierno holandés aprobó la nueva prueba PN-PTI (Regulación N° IENW/BSK-2020/125046) en reemplazo de la opacidad, para detectar la remoción/manipulación o fallas en los DPF de vehículos diésel modelo 2016 y posteriores. Esta nueva disposición entrará a regir a partir de julio de 2022. Alemania anunció en 2017 la introducción de la prueba a partir de enero de 2023. Bélgica se encuentra en proceso de

adoptar este tipo de prueba. La **Tabla 1** presenta una comparación entre los requerimientos de la prueba y de los equipos de medición para: Suiza, Holanda, Alemania y la sugerencia de VERT.

### 3.3.1. Grupo de trabajo NPTI - VERT

El grupo de trabajo se creó en el 2016 con el objetivo de investigar si era posible medir el número de partículas en prueba ITP. El grupo cuenta con la participación de Suiza, Holanda, Reino Unido, Bélgica y Alemania. Además, se incorporaron fabricantes de equipamiento de DPF y de equipos de medición de PM, organizaciones de metrología, el instituto de investigación holandés TNO y la autoridad holandesa de vehículos por carretera RDW.

El grupo de trabajo estableció las especificaciones técnicas de los equipos para conteo de partículas para su uso directo en el escape de vehículos durante la prueba de ITP. También debatió la manera en que debe realizarse la medición de partículas, así como la forma en la que debería establecerse el valor límite de PN para aprobar el procedimiento de evaluación.

En 2019 publicaron un artículo científico que describe la necesidad y las características de un nuevo procedimiento de prueba de emisiones de ITP para material particulado [18]. El documento está destinado a informar y guiar a las autoridades europeas, los fabricantes de equipos y los proveedores de servicios de ITP. Como resultado, varios países están considerando una prueba de emisiones obligatoria en el ITP, diseñada para identificar vehículos con altas emisiones. En 2021, VERT publica un documento técnico actualizado en el que resumen sus sugerencias sobre el procedimiento de la prueba (ver la **Tabla 1**). Este procedimiento se puede realizar sin ninguna optimización del vehículo. Sólo si el vehículo no aprueba, se puede repetir la prueba después de calentar y garantizar que la válvula de EGR esté cerrada. Adicionalmente, describen los valores típicos de vehículos con DPF en buen funcionamiento, con fallos o que requieren mantenimiento (ver la **Tabla 2**). Los cuales pueden ser usados para la determinación de límites de aprobación.

#### VERT – Latinoamérica

En colaboración con VERT, la Ciudad de México ha instalado equipos de medición PN (Testo Nanomet) en varios centros de ITP (verificentros) y han integrado la prueba PN-PTI al procedimiento existente de medición de gases para vehículos de gasolina con GPF [19]. En un reporte de 32.560 vehículos han encontrado que sólo un 2% de los vehículos son responsables del 62% de las emisiones totales de PN y fueron catalogados como muy altos emisores (PN ralentí > 3.000.000 #/cm<sup>3</sup>). En la categoría de altos emisores (1.000.000 < PN ralentí < 3.000.000 #/cm<sup>3</sup>), sólo el 2% de los vehículos medidos aportaban a un 10% de las emisiones totales de PN.

**Tabla 2. Límites de emisión de PN para detectar fallos en motor y sistema de postratamiento (específicamente DPF) según tipo de vehículo sugeridos por VERT [17]**

Tipo vehículo	PN emitido ( $\#/cm^3$ )			
	Buen estado	DPF dañado o manipulado	Requiere mantenimiento	Tipo prueba
Diésel LDV + HDV con DPF	3.000	>1.000.000	50.000	Ralentí bajo
Diésel LDV sin DPF	100.000	>1.000.000	250.000	Ralentí bajo
Gasolina PFI LDV con GPF	3.000	>1.000.000	50.000	Ralentí alto
Gasolina DI LDV con GPF	5.000	>10.000.000	50.000	Ralentí alto
Gasolina DI LDV sin GPF	100.000	>10.000.000	250.000	Ralentí alto

### 3.3.2. TNO

TNO es una organización de investigación independiente en Holanda. Desde 2012 el gobierno holandés le solicitó iniciar investigaciones para el desarrollo de un nuevo procedimiento que permitiera la verificación en prueba ITP y de carretera del estado de los DPF en vehículos diésel. Este desarrollo incluyó 3 componentes:

- Nuevo procedimiento de medición
- Especificaciones de equipos de medición
- Definición de valores límites para aprobación de la prueba

En la **Figura 6** se presenta la línea de tiempo de las investigaciones de TNO que, en 2017, derivan en la propuesta de un método de medición basado en la emisión de PN y, en 2019, con la sugerencia de los límites de aprobación [20].

En el estudio realizado en 2017 [13], encontraron que las emisiones de PN de vehículos diésel en ralentí, con DPF funcionando apropiadamente, eran muy estables y bajas, casi cero  $\#/cm^3$ . Al hacer la prueba en aceleración constante, se observaba una alta eficiencia del DPF, con PN igual o menor a 3000  $\#/cm^3$ . Por el contrario, vehículos con fugas en el DPF reportaron emisiones de PN de hasta 10.000.000  $\#/cm^3$  en pruebas de aceleración libre, lo cual no era detectado en la prueba de opacidad donde se obtenían valores extremadamente bajos (0.00 a 0.08  $m^{-1}$ ). Adicionalmente, se realizaron pruebas de medición de emisiones de PN en ralentí y siguiendo el ciclo de conducción NEDC en un chasis dinamométrico (ver **Figura 7**), en vehículos con DPF defectuosos, encontrando una correlación lineal entre estas dos mediciones. Estos dos hallazgos son la base de la prueba PN-PTI.

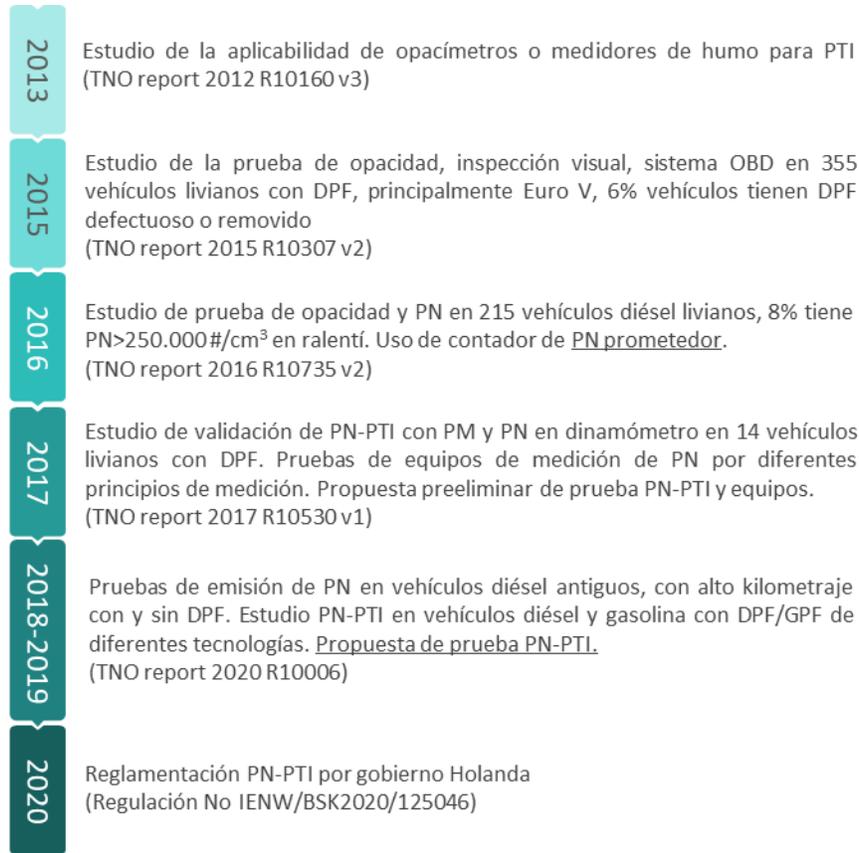
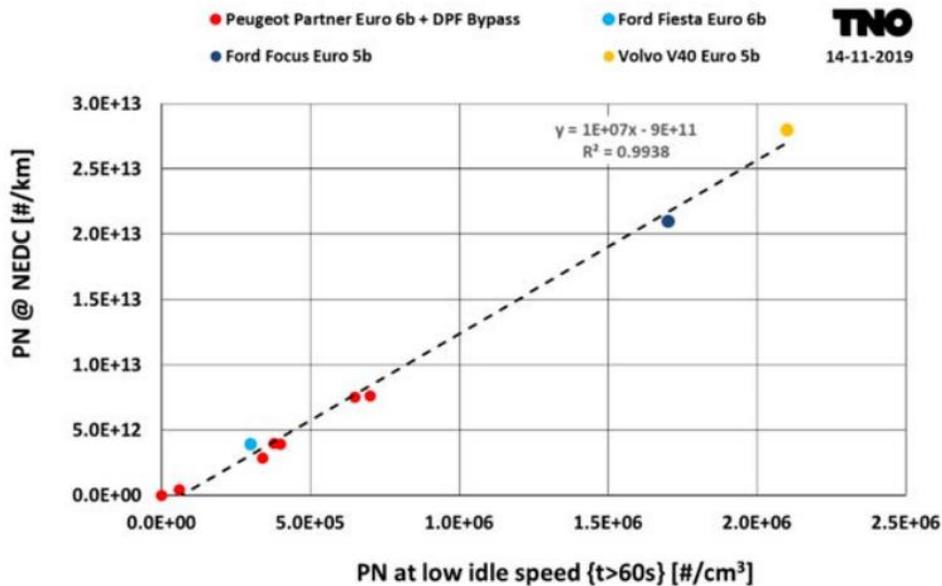


Figura 6. Línea de tiempo de investigaciones realizadas por TNO que conllevan a la propuesta de la nueva prueba PN-PTI adoptada por el gobierno de Holanda.



Fuente: TNO [13]

Figura 7. Emisión de PN en ralentí versus emisión de PN siguiendo el ciclo NEDC en pruebas de chasis dinamómetro de 3 vehículos diésel con DPF defectuoso.

Para la definición de los límites de emisión de PN, se usó la misma correlación lineal encontrada entre PN en ciclo NEDC y PN en ralentí. Se estimó que, para vehículos Euro 5b y Euro 6 diésel, un límite de 250.000 #/cm<sup>3</sup> en la prueba en ralentí sería adecuado, ya que permitiría identificar los DPF defectuosos y correspondería a una emisión de PN de  $2.5 \times 10^{12}$  #/km en la prueba siguiendo el ciclo NEDC, el cual es más flexible que el límite de  $6 \times 10^{11}$  #/km requerido en la prueba de homologación para esta misma tecnología vehicular. A su vez, para vehículos Euro 3, 4 y 5a diésel con DPF que no cuentan con normatividad de emisión de PN, sino de PM en masa, se realizó el mismo análisis, encontrando que un límite de entre 1.000.000 y 1.500.000 #/cm<sup>3</sup> en la prueba en ralentí sería adecuado.

Después estudios comparativos entre diferentes equipos y principios de medición, TNO recomendó medir con un equipo de conteo por condensación (CPC), pues resultaron ser mejores que los de difusión por carga (DC) [13], [16]. El instituto de metrología holandés (NMI) desarrolló las especificaciones para los equipos de medición de PN-PTI, incluyendo los procedimientos de calibración. Este proceso se realizó en el marco del grupo de trabajo de VERT y reunió a las partes interesadas: fabricantes, organizaciones científicas y organizaciones que realizan las pruebas ITP. Las especificaciones definidas por diferentes países se presentan en la **Tabla 1**.

### 3.3.3. European Commission Joint Research Centre (JRC)

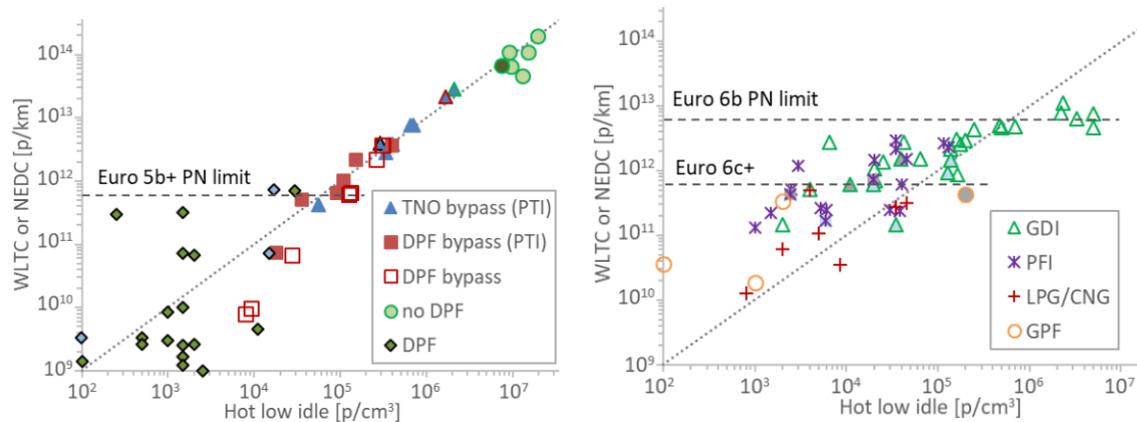
El programa de medición de partículas (PMP) del JRC fue creado en 2001 para desarrollar nuevas técnicas que complementaran o reemplazaran la medición de masa de partículas en filtros, con especial consideración a la medición de emisiones de partículas a niveles muy bajos. Se realizaron numerosos estudios para definir las especificaciones detalladas de los procedimientos y equipos de prueba, que fueran adecuadas para las pruebas de homologación de vehículos ligeros y motores de servicio pesado y para su uso en pruebas transitorias, y demostrar la repetibilidad y reproducibilidad de las técnicas propuestas [21].

JRC propuso un nuevo método de medición de PN sólido, utilizando un sistema de pre-acondicionamiento de la muestra para remover partículas volátiles (VPR), en el rango de partículas entre 23 nm y 2.5 μm (PM<sub>2.5</sub>). La motivación para excluir las partículas volátiles (<23 nm) es aumentar la estabilidad y repetibilidad de la medición. Esta medición mostró suficiente sensibilidad para identificar diferentes estados de operación de DPFs, y la alta repetibilidad en vehículos diésel [21]. Como resultado, en 2011 se introdujo en la normativa europea el método del conteo de PN para vehículos ligeros diésel (Euro 5b). Posteriormente se extendió a vehículos de gasolina con motores de inyección directa y vehículos pesados, así como a motores de maquinaria móvil no de carretera diésel. En 2016 la Unión Europea, por medio del programa Horizonte 2020, financió varios programas para proceder hacia la medición de partículas de tamaño menor a 23 nm [22]. Actualmente se debaten los procedimientos y estándares de equipos de medición para la nueva prueba de PN que extienda el rango inferior de medición de partículas a 10 nm. En un estudio reciente con 3

vehículos a GNV encontraron que, si se tiene en cuenta el rango de tamaño de partícula entre 10 y 23 nm, la emisión de PN sólido podría ser entre 3 y 10 veces mayor [23].

JRC ha realizado varios estudios donde compara diferentes principios de medición de PN y diferentes equipos y laboratorios de medición [24]. Existen dos principios de medición para el conteo de partículas: conteo por condensación (CPC) y difusión de carga (DC). En general el CPC es la tecnología más madura que existe en el mercado y se utiliza generalmente como referente para calibración de equipos. Los equipos de DC, aunque menos precisos, tienen la ventaja de no ser sensibles a las vibraciones, convirtiéndolos en buenos candidatos para mediciones en condiciones reales de conducción. Independiente del principio de medición, es necesario contar con un VPR para evitar el sobre conteo de partículas por la presencia de compuestos orgánicos volátiles [25].

Recientemente, y en el marco del grupo NPTI-VERT, JRC publicó un estudio comparando resultados de emisión de vehículos, con y sin DPF, en prueba ITP y en prueba de homologación siguiendo un ciclo de conducción (ver **Figura 8**) [26]. Estos resultados incluyen los datos recolectados con equipos para ITP realizados por TNO y JRC, así como datos recolectados con PN-PEMS por JRC. Se hace un análisis muy interesante de los datos obtenidos en ciclos de conducción, desagregando específicamente los períodos de ralentí frío y caliente de los ciclos y obteniendo la emisión PN promedio en estos períodos.



Fuente: JRC [26]

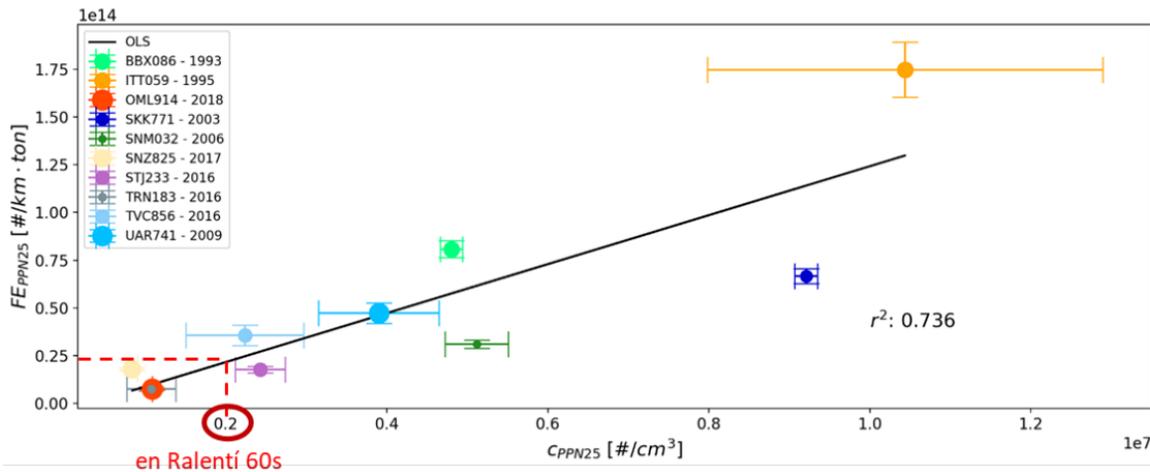
**Figura 8.** Emisión de PN siguiendo el ciclo NEDC o WLTC en pruebas de chasis dinámometro versus emisión de PN en ralentí caliente: (izquierda) vehículos diésel, (derecha) vehículos gasolina o gas natural. Los datos en ralentí se obtienen de dos formas: (PTI) con equipo de PN para prueba ITP; los demás en ciclo de conducción extrayendo los períodos de ralentí caliente con equipo PN-PEMS.

Con una mayor población de datos, se comprueba correlación lineal entre la emisión de PN durante el ciclo de homologación y en ralentí caliente, para vehículos diésel y de gas natural. Para vehículos diésel (**Figura 8** izquierda), por debajo del límite de emisión para homologación ( $6 \times 10^{11}$  #/km), existe mayor dispersión de los datos, pero por encima de este valor hay una alta correlación, indicando la idoneidad de la prueba de emisión de PN al ralentí

caliente para identificar altos emisores. Para los vehículos de gas natural evaluados (Figura 8 derecha), se encontró baja emisión de PN al ralentí entre 800 y 45.000 #/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.4. Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)

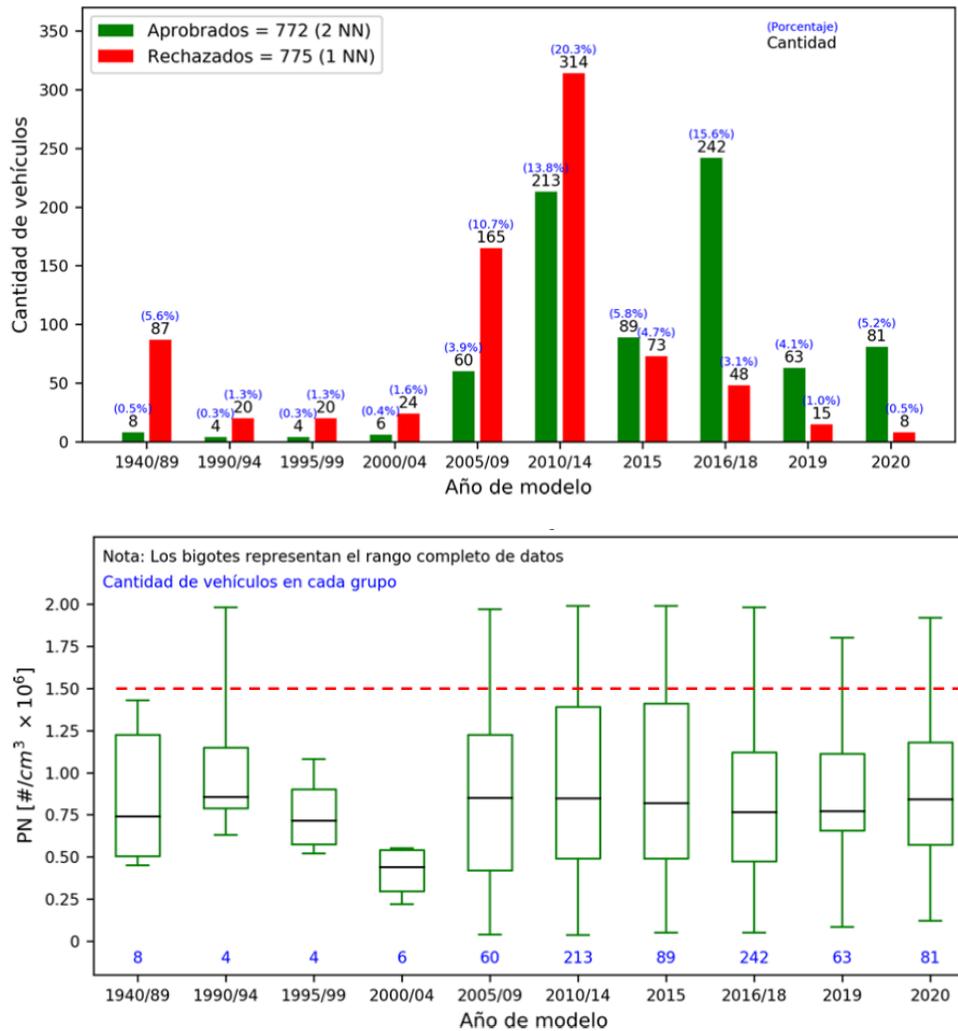
El AMVA es la autoridad ambiental del Valle de Aburrá, que comprende 10 municipios, entre ellos la ciudad de Medellín. Desde 2016, ha realizado convenios interadministrativos con la Universidad de Antioquia para determinar los factores de emisión reales de vehículos livianos, motocicletas, buses, busetas, camiones y volquetas, siguiendo ciclos de conducción específicamente desarrollados para estas categorías y representativos de la región [12]. En este estudio se corroboró la baja correlación entre la prueba de opacidad y la emisión de PM<sub>2.5</sub>, dando lugar a la sugerencia de una nueva prueba ITP para emisión de partículas basada en el conteo de PN. De forma similar al estudio realizado por JRC, se evaluó la correlación entre el factor de emisión de PN (#/km) en ciclo de conducción de la región y la emisión de PN al ralentí caliente (#/cm<sup>3</sup>) extraída en un período de 60 segundos durante el ciclo de prueba. Los resultados para 10 vehículos diésel sin DPF de tecnologías Euro IV e inferiores (modelos entre 1993 y 2018) se presentan en la Figura 9. Se determinó inicialmente un umbral de 2.000.000 #/cm<sup>3</sup> como límite para detectar vehículos diésel sin DPF altamente contaminantes.



Fuente: AMVA [12]

Figura 9. Emisión de PN siguiendo el ciclo de conducción del AMVA versus emisión de PN en ralentí caliente.

Utilizando este límite para la emisión de PN, en 2019 se realizó una campaña para implementar distintivos ambientales a vehículos diésel pesados en una prueba de 60 segundos al ralentí, utilizando como equipo de medición de PN un Pegasor PPS y un Dekati ELPI, ambos con principio de medición DC. Se midieron 1547 vehículos, con un porcentaje de aprobación del 50%. La distribución por modelos se presenta en la Figura 10 superior. Entre los vehículos aprobados se encontró que más del 75% aprobaba con valores de emisión de PN menores a 1.500.000 #/cm<sup>3</sup> (ver Figura 10 inferior), y se determinó que la disminución del umbral tendría un efecto de solo 5 puntos porcentuales en la aprobación de vehículos.

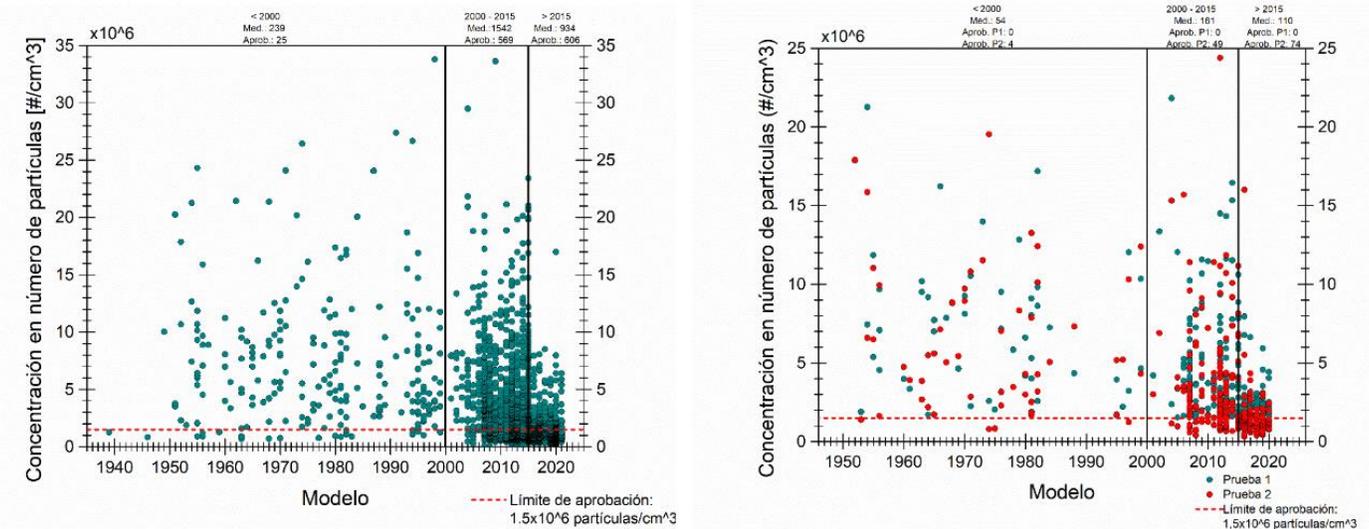


Fuente: AMVA [27]

**Figura 10.** Resultados de aprobación de prueba PN-PTI de vehículos pesados en el AMVA durante el primer piloto de distintivo ambiental en 2019: (superior) porcentaje de aprobación y rechazo en diferentes modelos, (inferior) emisión de PN de vehículos que aprobaron la prueba según modelo.

Con base en los resultados del primer piloto voluntario de distintivos ambientales, se realizó un segundo piloto con un límite de aprobación de 1.500.000 #/cm<sup>3</sup> en el año 2020. Para este piloto se utilizó un CPC 3795-HC (con límite de detección de hasta 100.000.000 #/cm<sup>3</sup>), y la adaptación del procedimiento de prueba PN-PTI propuesta por TNO, ampliando los períodos de medición de 5 a 15 segundos. Se midieron 3040 vehículos diésel pesados sin DPF, con un porcentaje de aprobación del 44%. La tasa de aprobación aumenta considerablemente para vehículos modelo 2016 y posteriores, como muestra la **Figura 11** izquierda. Se realizó una segunda medición a 323 vehículos a los que se les hizo algún tipo de mantenimiento por parte de los propietarios, con aprobación del 39%, principalmente en modelos posteriores al 2016 (ver **Figura 11** derecha). Los cambios reportados por los propietarios que mostraron una mayor incidencia en la aprobación son:

- Mantenimiento preventivo
- Calibración de inyectores/válvulas
- Uso de combustible B20 (20% de biodiésel de palma).



Fuente: AMVA [27]

Figura 11. Resultados de emisión de PN en prueba PN-PTI de vehículos pesados en el AMVA durante el segundo piloto de distintivo ambiental en 2020: (izquierda) todos los vehículos medidos, (derecha) vehículos con remediación.

### 3.3.5. Swisscontact: CALAC y CALAC+

En la Figura 12 se pueden apreciar algunas de las experiencias más relevantes de COSUDE en Latinoamérica.



Figura 12. Línea de tiempo de estudios y experiencias de Swisscontact, CALAC y CALAC+, en el conteo de partículas en Latinoamérica.

Entre los años 2004 - 2011, las autoridades chilenas en cooperación con el gobierno suizo implementaron un programa de *retrofitting* de DPF en buses del sistema público de transporte de Santiago de Chile (Transantiago) [28]. Este piloto contó entre sus resultados la

certificación local de DPFs, así como la aprobación de la norma de ingreso para el ingreso de buses con filtro de fábrica y cuya entrada en vigencia se daría a partir del año 2010 [29].

En el 2015, en el marco del programa CALAC, se logró la mejora de la aplicación, uso y mantenimiento de filtros DPF en Chile y se permitió el desarrollo en la regulación sobre filtros DPF en Bogotá [30]. Desde el 2018, mediante la continuación de este programa, CALAC+, se han realizado conferencias, capacitaciones y consultorías en torno al análisis de los impactos económicos y sociales tanto para las normas de medición de número de partículas, como para la migración a las normas de emisiones Euro 6/VI en Perú, y el estudio de fiscalización y control de la flota vehicular Euro V y Euro VI para Colombia, del cual se habla con más detalle en la sección 3.4 [2]. En este estudio se realizó la prueba de PN a 4 buses de Transmilenio provistos con DPF y se recomendó la prueba en reemplazo de la opacidad de humos, para vehículos Euro VI. En consecuencia, en 2020, se presentó la *Guía técnica para la inspección técnica periódica (ITP) de vehículos provistos con filtros de partículas diésel basado en el conteo de partículas*, desarrollada por un comité técnico conformado por universidades, instituciones gubernamentales encargadas de la regulación y control ambiental de México, Chile, Colombia y Perú, representantes y coordinadores de CALAC+ y expertos internacionales.

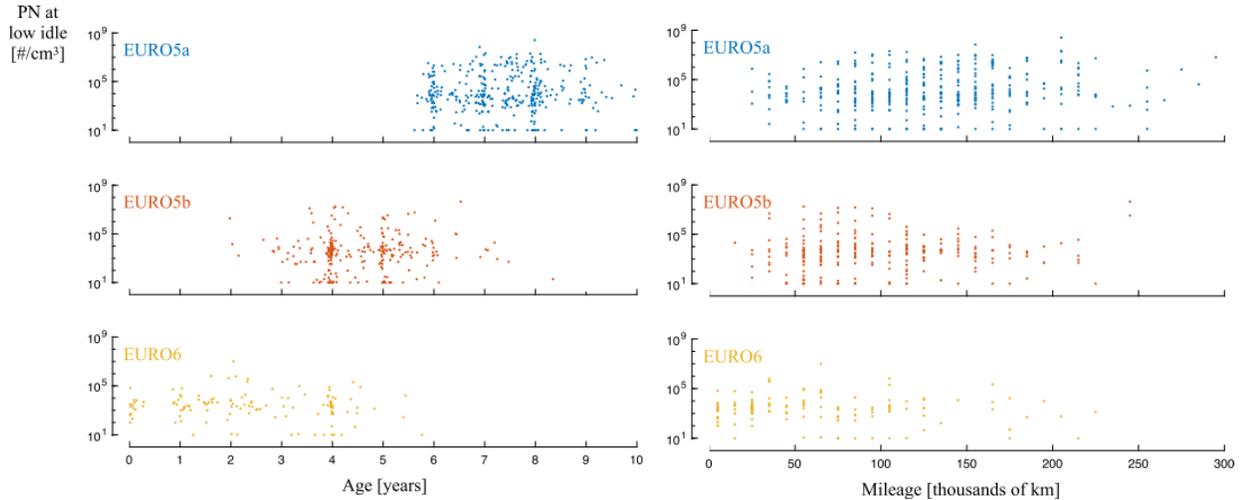
### 3.3.6. Otros estudios técnicos y científicos de mediciones de PN en prueba ITP

En 2019 se publicó en Bélgica un estudio con la muestra de vehículos diésel livianos con DPF más grande a la fecha, con 263 vehículos Euro 5 y 41 Euro 6, que confirma la viabilidad de la prueba de conteo de PN-PTI (mismo procedimiento propuesto por TNO) para detectar altos emisores [14]. Los resultados muestran que el 70% de los vehículos tenían muy bajas emisiones (<25.000 #/cm<sup>3</sup>). Con un límite de 250.000 #/cm<sup>3</sup> la tasa de reprobación sería de 15.2% de la flota medida. El kilometraje de los vehículos se identificó como un factor de aumento en las emisiones de PN. Adicionalmente, se realizaron pruebas de opacidad a todos los vehículos y se comprobó su incapacidad de detectar aquellos con fallos en el DPF.

En una campaña de mediciones posterior, los mismos autores [31] realizaron la prueba de PN-PTI a 757 vehículos diésel livianos: 368 Euro 5a, 261 Euro 5b y 128 Euro 6. El propósito principal de este estudio era estimar los factores de emisión de estos vehículos a partir de la emisión de PN en ralentí y la correlación encontrada por TNO y JRC (**Figura 13** derecha). También evaluaron el impacto de la antigüedad y kilometraje de los vehículos en las emisiones de PN en ralentí (ver **Figura 13**).

En el año 2002 la agencia ambiental de California publicó una comparación de la emisión de PN al ralentí de 3 buses: diésel sin DPF, diésel con DPF y GNV [32]. Los resultados muestran que la emisión del vehículo a gas es similar al vehículo diésel con DPF, e incluso en algunas pruebas la emisión del vehículo a gas estuvo por debajo del blanco del túnel de dilución. Por otra parte, la distribución de tamaños de partículas emitidas muestra mayor emisión de partículas menores a 20 nm en el bus propulsado por gas natural, no estaba claro si era por

la presencia de partículas de este tamaño o por hidrocarburos no quemados, ya que dicho bus no contaba con catalizador de oxidación.



Fuente: [31]

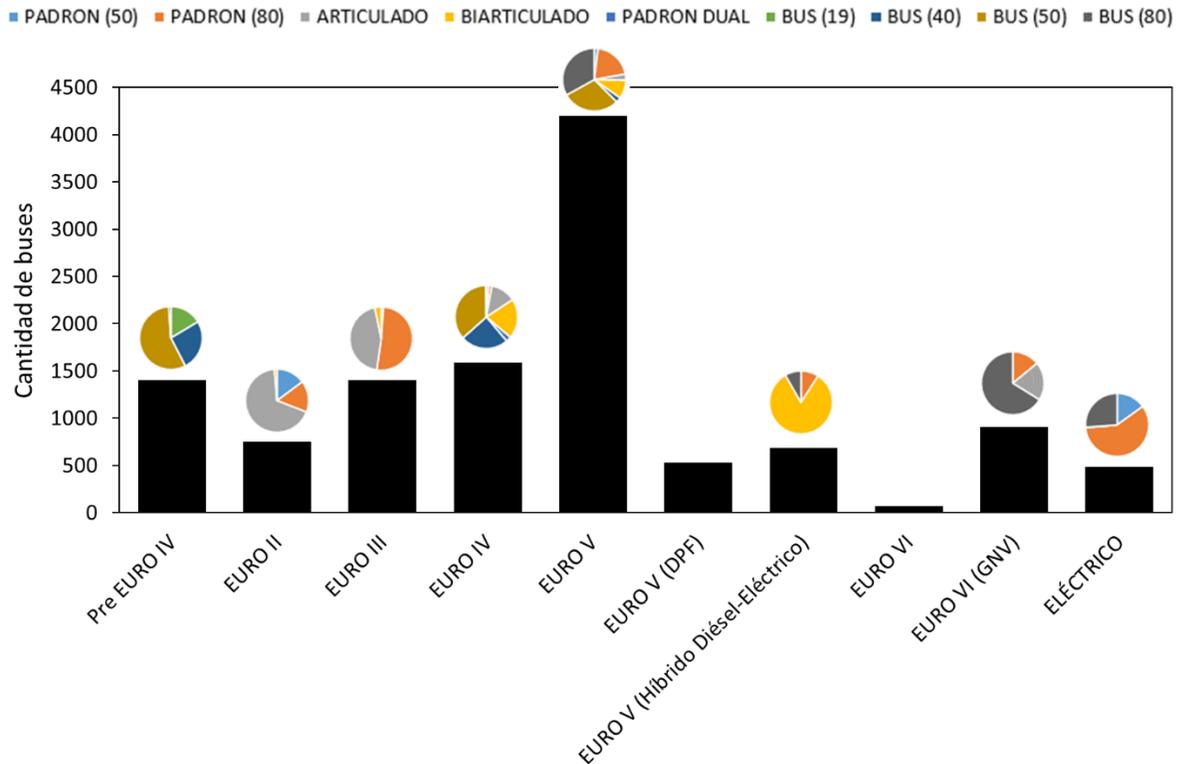
**Figura 13.** Emisión de PN en ralentí en vehículos diésel livianos de tecnologías Euro 5a,b y Euro 6 según su antigüedad (izquierda) y kilometraje (derecha).

En 2021 JRC publicó un estudio donde realizaron mediciones de PN en ciclos de homologación para vehículos que utilizan gas natural [23]. Encontraron que, si se miden partículas sólidas mayores a 23 nm, las emisiones de PN no superan los límites establecidos para vehículos diésel o gasolina. Pero, si se contabilizan partículas sólidas <23nm se podrían exceder los límites de emisión de PN.

### 3.4. Sistema BRT de Bogotá: Transmilenio

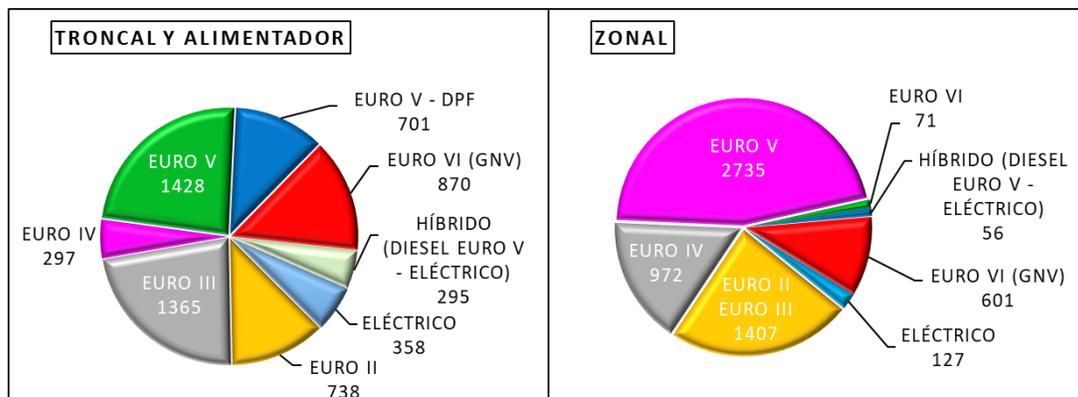
En el informe de *Fiscalización y control de flota vehicular Euro V y Euro VI para Colombia* realizado por CALAC+ en el 2019 [2], se hizo una descripción del parque automotor colombiano, enfocado en vehículos pesados que, en su mayoría, utilizaban motores diésel, específicamente de la flota de transporte público de Bogotá.

TransMilenio es el sistema público de transporte masivo de buses de Bogotá, actualmente, cuenta con 19 concesionarios privados entre provisión y operación. Los vehículos son propiedad privada de los operadores, y tanto su operación como mantenimiento está a cargo de estos. El sistema, que comenzó a operar en el año 2000, en la actualidad cuenta con una flota troncal y de alimentación de aproximadamente 3316 buses de diferentes categorías (articulados, biarticulados y padrones) y una flota zonal de 6465 buses (fuente: TRANSMILENIO S.A). La distribución del tipo de buses en diferentes tecnologías vehiculares se presenta en la **Figura 14**.



**Figura 14.** Distribución de la flota de Transmilenio según tecnología vehicular y tipo de bus. Fuente de los datos: TRANSMILENIO S.A. Nota: Aquellos que están clasificados como *Pre Euro IV* son buses de los que no se conoce exactamente su tecnología, pero que se sabe que son anteriores a Euro IV.

En 2018, en el marco de la renovación de las concesiones de buses troncales, 1162 buses con tecnologías Euro V e inferiores fueron reemplazados por 1441 buses con tecnologías Euro VI a gas natural (GNV) y Euro V diésel con DPF adaptado. También ingresaron, desde el 2013, 336 buses híbridos eléctrico/diésel Euro V. A la fecha, se han incorporado al sistema 72 buses Euro VI diésel con DPF de fábrica. La distribución de buses por tecnología de la flota troncal y zonal se presenta en la **Figura 15**.

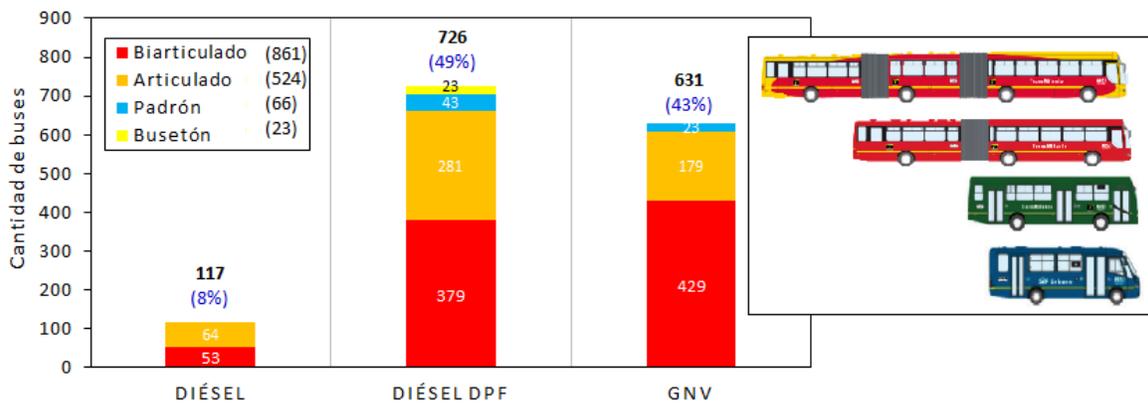


**Figura 15.** Composición de la flota de Transmilenio según tecnología vehicular para la flota troncal y zonal. Fuente de los datos: TRANSMILENIO S.A.

## 4. Metodología

### 4.1. Caracterización de flota de buses estudiada

Se midieron 1474 buses de Transmilenio de diferentes tipologías: biarticulado (240-260 pasajeros), articulado (180 pasajeros), padrón (80 pasajeros) y busetón (50 pasajeros), como se presenta en la **Figura 16**. El 57% de los vehículos medidos usan como combustible diésel, entre estos el 86% está equipado con DPF. El 43% restante de los vehículos usan como combustible GNV.



**Figura 16.** Distribución de vehículos medidos según el tipo (biarticulado, articulado, padrón y busetón) y el combustible. El número sobre cada barra indica la cantidad total de buses y el porcentaje sobre el total, dentro de las barras indica la cantidad de cada tipo de bus.

La caracterización de los vehículos según su año de fabricación (modelo) y tecnología de emisiones se presenta en la **Figura 17**. Más del 90% de los buses son modelos nuevos (2019-2021) con tecnologías de bajas emisiones de PM: bien sea equipados de DPF o usando combustible a GNV, como lo muestra específicamente la **Figura 18** (superior izquierda). Los modelos más antiguos (2004-2015) usan todos combustible diésel y no poseen sistema de postratamiento de partículas. En la **Figura 18** se presenta también la distribución de buses por marca, cilindrada y zona de medición. Hay dos marcas que predominan entre los buses medidos: Volvo con buses diésel de tecnologías desde Euro II hasta Euro VI y Scania con buses a GNV. En 2021 entraron a la flota 23 buses diésel Euro VI marca Volkswagen. Los buses se midieron en 8 patios troncales y 3 zonales, pertenecientes a 9 concesionarios de operación.

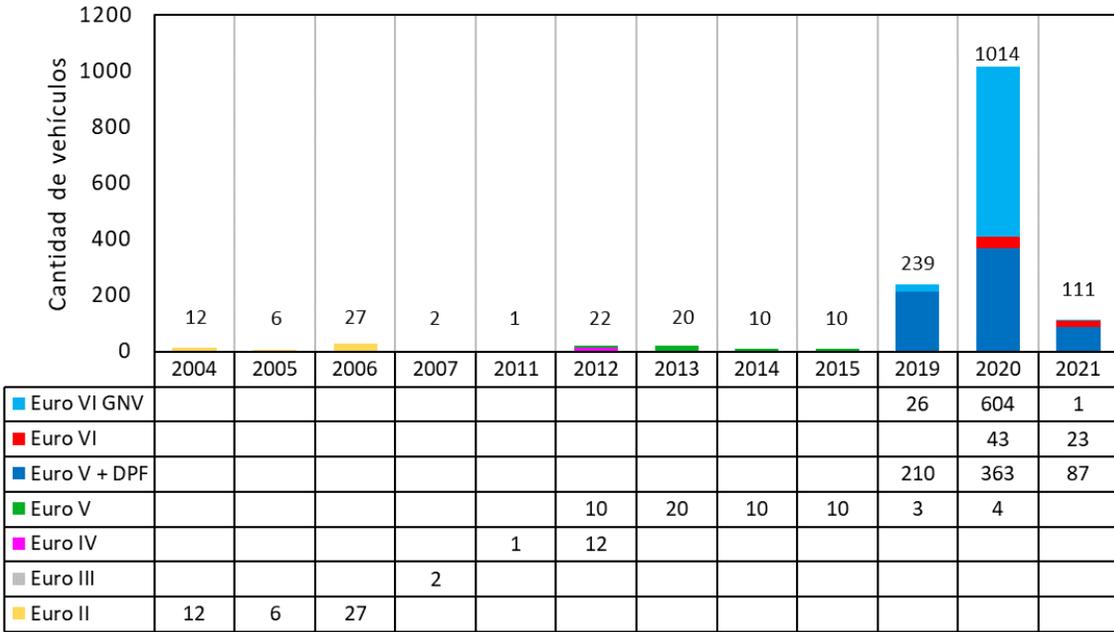


Figura 17. Distribución de vehículos medidos según año modelo y tecnología vehicular. El número sobre cada barra indica la cantidad total de buses y el porcentaje sobre el total.

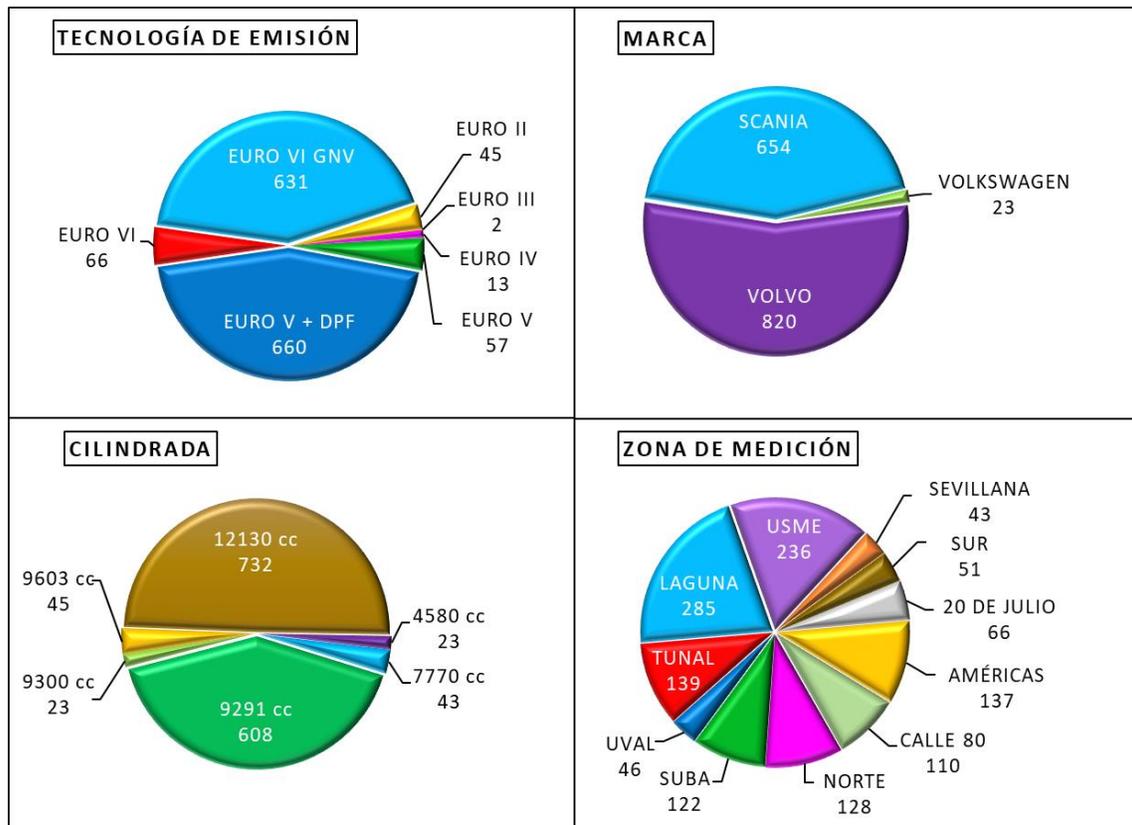


Figura 18. Caracterización de la flota de buses medida según: tecnología de emisión, marca, cilindrada y lugar de medición.

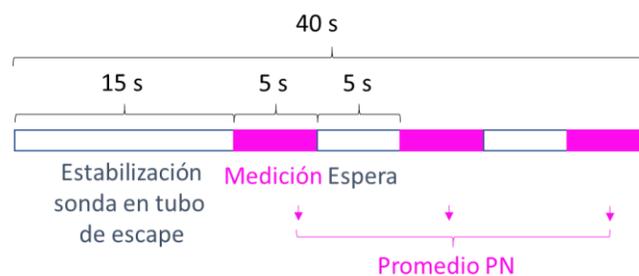
En la **Tabla 3.** se describe el tipo de postratamiento de gases que tienen los buses e imágenes de los mismos.

Tabla 3. Descripción de sistemas de postratamiento de los buses medidos según la tecnología de emisiones		
TECNOLOGÍA	BUS	POSTRATAMIENTO
EURO VI GNV		Catalizador de tres vías y recirculación de gases (EGR)
		Catalizador de tres vías y recirculación de gases (EGR)
Euro VI Diésel		Conjunto DPF y SCR (Volvo)
		Conjunto DOC, DPF y SCR (Volkswagen)

EURO V + DPF		<p>Conjunto DOC y DPF (CRT)</p>  <p>SCR</p> 
EURO V		SCR + DOC
EURO IV		Volvos modelos 2019/2020
EURO III		Convertidor catalítico de oxidación (DOC)
EURO II		Convertidor catalítico de oxidación (DOC)

#### 4.2. Procedimiento de prueba de conteo de partículas y equipos de medición

El conteo de partículas se realizó siguiendo el protocolo desarrollado en la *Guía técnica para la Inspección Técnica Periódica (ITP) de vehículos provistos con filtros de partículas diésel basado en el conteo de partículas* de CALAC+ [33]. La prueba consiste en la medición de la concentración del número de partículas ( $\#/cm^3$ ) del gas de escape del vehículo en ralentí. Este protocolo se basa en el método para medir el número de partículas en el escape de vehículos provistos con DPF durante pruebas de ITP, desarrollado por el grupo de trabajo internacional NPTI-VERT y la regulación suiza SR941.242 para inspección de maquinaria de construcción con filtro DPF. El *software* de medición viene automatizado con el procedimiento de la prueba según la resolución suiza, como se muestra en la **Figura 19**.



**Figura 19.** Procedimiento de medición de PN automatizado en el *software* del NPET.

#### 4.2.1. Equipos de medición

##### NPET 3795

Se utilizó un equipo de conteo de partículas por condensación (CPC) marca TSI, referencia NPET-3795 (ver **Figura 20**), certificado por el Instituto Metrológico Suizo (METAS) para el conteo de partículas según la regulación SR941.242. Las características principales de este equipo se presentan en la **Tabla 4**, la ficha técnica y certificado de calibración se presentan en los Anexos.



Fuente: TSI

**Figura 20.** Equipo NPET 3795 fabricado por TSI Inc.

Tabla 4. Especificaciones contador de partículas	
Marca	TSI
Modelo	NPET 3795
Rango de tamaño de partículas	23 – 1000 nm
Rango de concentración de partículas	1.000 – 5.000.000 #/cm <sup>3</sup>
Exactitud en la concentración de partículas	± 10% (respecto a estándar)
Eficiencia de remoción de partículas volátiles	>99% (C <sub>40</sub> H <sub>82</sub> de 30nm)
Eficiencia de detección	
23 nm	E < 50%
41 nm	E > 50%
80 nm	70% < E < 130%
200 nm	E < 200%
Normatividad	SR941.242 Gob. Suizo
Fecha de calibración	9/02/2021

##### Dilutor

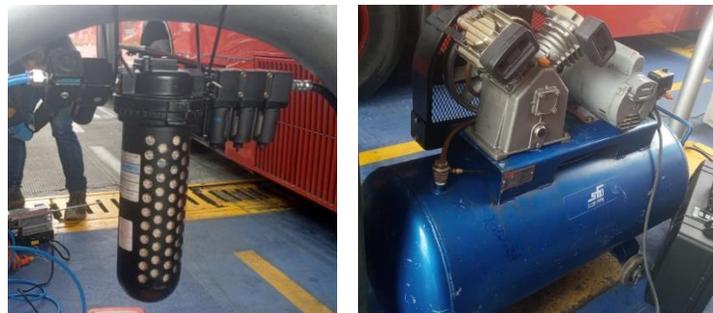
Dado el límite superior de detección concentración de partículas del NPET (5.000.000 #/cm<sup>3</sup>) y previendo que algunos de los buses medidos, al no contar con sistema de postratamiento DPF (Euro II, III, IV y V), podrían superar este límite, se dispuso de un dilutor externo para diluir la muestra tomada del tubo de escape y bajar la concentración de partículas a la entrada del NPET, protegiendo el equipo y evitando su saturación.

Se utilizó un dilutor automático, de operación digital, eDiluter™ Pro marca Dekati<sup>®</sup> (ver **Figura 21**), diseñado para aplicaciones de dilución de aerosoles incluyendo emisiones de motores. El dilutor toma aire del ambiente por medio de un compresor, y elimina su humedad y partículas con un secador y filtros HEPA, que se muestran en la **Figura 22**. Con una cantidad conocida este aire diluye la muestra del tubo de escape del bus. Las especificaciones del dilutor se presentan en la **Tabla 5**. Se adaptó la sonda del NPET al dilutor, de tal forma que permitiera la flexibilidad requerida para adaptarse a las diferentes geometrías de tubos de escapes.

Tabla 5. Especificaciones Dilutor	
Marca	Dekati
Modelo	eDilutor Pro
Factor de dilución	Ajustable mín. 1:25, máx. 1:225
Penetración de partículas	>90% para partículas <200nm
Presión de entrada muestra	850-2200 mbar
Temperatura entrada muestra	Max 600°C
Flujo de dilución (salida)	50-80 lpm
Temperatura de dilución	Máx. 400°C
Normatividad	ECE-R83, ECE-R49,
Fecha de calibración	18/02/2020



**Figura 21.** Dilutor eDiluter marca Dekati (izquierda), adaptación sonda del NPET (derecha).



**Figura 22.** Equipos auxiliares del dilutor: sistema de filtros y secado (izquierda) y compresor de aire (derecha).

### 4.3. Procedimiento de la prueba

En los Anexos a este documento se presenta el *Instructivo Para Medición de Número de Partículas*, que describe en detalle el procedimiento utilizado para la medición de PN, la preparación y mantenimiento del NPET antes y durante las mediciones. Además, incluye otros aspectos técnicos de la prueba según el tipo de vehículo de medición. En este documento, presentamos un resumen del proceso de medición.

#### Pasos previos a la medición:

- *Chequeo diario del cero:* al inicio de cada jornada de medición se realiza una medición de cero del equipo, con el propósito de verificar si existen fugas, o contaminación dentro del equipo. La prueba consiste en adaptar un filtro HEPA a la sonda de muestreo.
- *Medición de PN ambiente:* Al iniciar el día y aproximadamente cada hora de mediciones, se realiza una medición de PN del ambiente, con la sonda libre en el punto de medición, sin vehículos cerca. Este valor se registra y utiliza para chequear el buen funcionamiento del equipo.
- *Medición de temperatura:* previo a la medición de cada bus, se realiza una medición de temperatura para confirmar que se encuentre en la temperatura típica de operación. La temperatura se midió con un termómetro infrarrojo en 3 puntos del cárter y se tomó su promedio, como se muestra en la **Figura 23**.

El cárter aloja el aceite lubricante del motor, y permite medir de forma rápida un valor cercano a su temperatura. En muchos casos no es posible realizar la medición de temperatura debido a inaccesibilidad o a recubrimiento externo del cárter. En esos casos se consulta en el tablero del bus que el indicador de temperatura esté en un punto cercano al de operación, lo cual se confirma con el conductor del bus.



**Figura 23.** Medición de la temperatura del cárter en la parte trasera del bus (izquierda), debajo del bus (centro), en el tablero del bus (derecha).

#### Procedimiento de medición

Se realizó un procedimiento adaptado de la *Guía técnica para la Inspección Técnica Periódica (ITP) de vehículos provistos con filtros de partículas diésel basado en el conteo de partículas* desarrollada por CALAC+ [33], que se ilustra en la **Figura 24**. En los vehículos con DPF o combustible GNV, se chequeaba la presencia de hollín en el tubo de escape y se anotaba en las observaciones de la base de datos. Se seleccionaron aleatoriamente algunos vehículos con DPF que tuvieran emisión de PN mayor al promedio de la flota medida durante el mismo día, se realizó una segunda medición con el vehículo en ralentí alto. Este procedimiento sólo se realizó cuando la logística de medición lo permitía, con el propósito de detectar daños o requerimiento de mantenimiento en DPF.

*Nota:* si se cuenta con un instrumento de medición para altas concentraciones se puede evitar el uso del dilutor en vehículos diésel sin DPF, y conectar la sonda del equipo directamente al tubo de escape para la medición.

#### Corrección por dilución externa

Para la medición de algunos buses diésel sin filtro DPF se usó una etapa externa de dilución. Por esto, se debe hacer la corrección del valor medido por la dilución efectivamente aplicada. Para establecer este factor de dilución, cada día de medición de estos buses se realizaron pruebas con el NPET directamente y con el NPET utilizando el dilutor. Se seleccionaron

aquellos buses que en su medición con dilución externa daban valores suficientemente bajos, que permitían inferir que al medirse directamente con el NPET no superarían el límite de concentración de PN de 5.000.000 #/cm<sup>3</sup>, sin correr riesgos de saturación del equipo. Para estos buses, se repitió el procedimiento de medición directamente con el NPET.

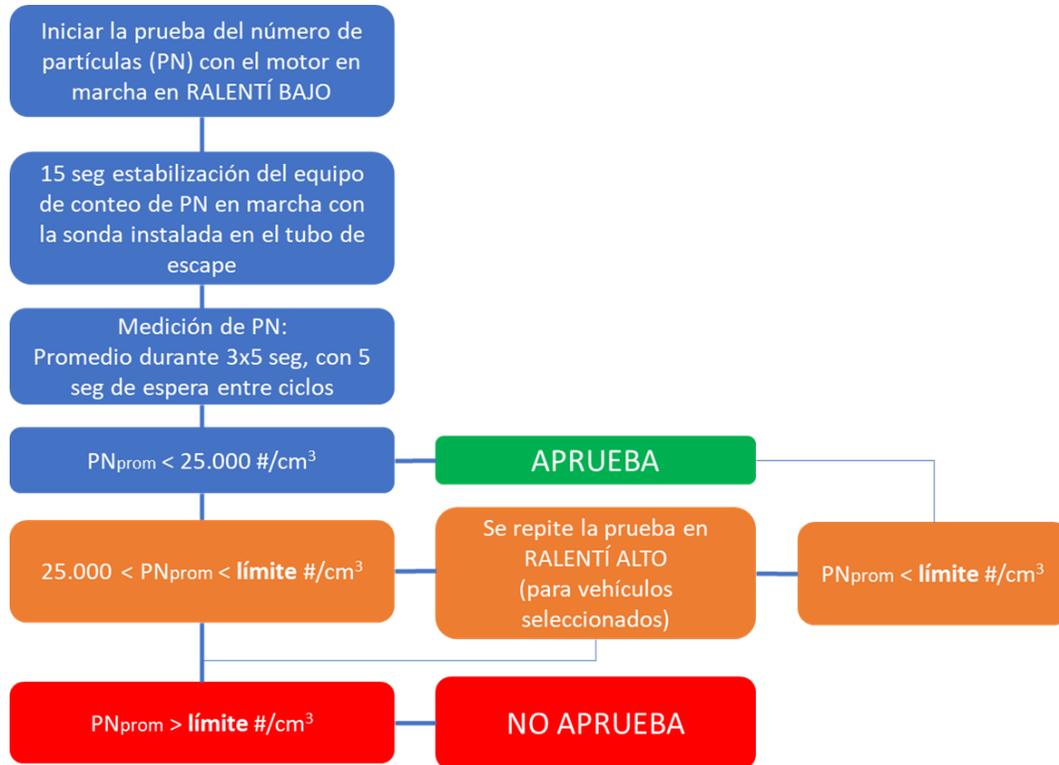


Figura 24. Procedimiento de medición de PN en buses de Transmilenio en Bogotá.

La **Tabla 6** presenta los valores de PN medidos a diferentes buses con y sin dilución. En todas las pruebas el dilutor se configuró para una dilución de 50, combinando una primera etapa de dilución de 10 y una segunda etapa de 5. El factor se seleccionó después de realizar pruebas preliminares con factores de 25, 50 y 100, encontrando mayor estabilidad y repetibilidad del dilutor en el factor de dilución de 50. Se realizaron pruebas preliminares de dilución durante 2 días, y de medición de buses sin DPF otros 2 días. Estas pruebas permitieron determinar que la dilución efectiva se debe estimar cada día de prueba y utilizar el valor encontrado para la corrección de las mediciones del mismo día. Los resultados muestran que la dilución real está, en promedio, entre  $43 \pm 8$ , para el día 28 de junio.

Del total de 117 buses sin DPF medidos, 63 se midieron sin dilución, directamente con el NPET; 27 se midieron utilizando sólo el dilutor (todos el día 28/06/2021); y 27 fueron medidos con y sin dilución (en la **Tabla 6** se presentan los resultados del día 28/06/2021) permitiendo estimar el factor de dilución real. Para los buses medidos con y sin dilutor se toma el valor de PN obtenido directamente con el NPET. Para buses medidos sólo con dilutor, se utiliza el factor de corrección de 43. Teniendo en cuenta la desviación en el factor de dilución calculado, el error máximo inducido al PN corregido es de 18.6%.

Tabla 6. Estimación del factor de dilución para corrección de mediciones de PN				
Fecha	Dilución teórica	PN (#/cm <sup>3</sup> ) Con dilución	PN (#/cm <sup>3</sup> ) Sin dilución	Dilución real
28/06/2021	50	19.569	695.541	36
	50	31.133	1.085.044	35
	50	31.494	1.711.120	54
	50	29.651	1.220.151	41
	50	30.271	1.649.289	54
	50	27.205	962.721	35
	50	32.946	1.170.295	36
	50	29.203	1.360.507	47
	50	23.397	1.106.487	47
<b>Promedio</b>				<b>43</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>8</b>

#### 4.4. Recolección y análisis estadístico de datos

Se diseñó un sistema de almacenamiento y organización de la información *online* por medio de carpetas compartidas en Google Drive. Así, el equipo de la Universidad de Antioquia tenía acceso a toda la información actualizada día a día de las mediciones. Por su parte, los coordinadores de CALAC+ tenían acceso a la base de datos actualizada con los resultados de las mediciones.

Se desarrolló una base de datos en MS Excel que contenía toda la información relevante de los buses a medir. Esta información fue suministrada por TRANSMILENIO S.A. Cada día de medición se ingresó a esta base de datos la información de las mediciones: día, hora, kilometraje, temperatura del cárter, régimen de giro en ralentí bajo (rpm ralentí), resultado de emisión de PN al ralentí bajo y al ralentí alto (en caso de repetir la prueba). Se ingresaban también observaciones como la presencia visual de hollín en el tubo de escape, o novedades del CPC. La **Figura 25** muestra un diagrama del procedimiento para el almacenamiento, organización y tratamiento de datos.

##### Análisis estadístico de datos

El análisis de datos se realizó a partir de la base de datos (archivo MS Excel). Este archivo se procesó en Python mediante las librerías Pandas, NumPy y Matplotlib. De este modo se pudo filtrar por tipos de vehículos, tecnología de emisiones, zona de medida, y por todas las variables de interés. Así, se pudieron obtener resultados básicos de estadística descriptiva, tales como histogramas, curvas de frecuencia acumulada, y diagramas de cajas y bigotes. En cada caso de análisis se identificó la cantidad de datos y se verificó la consistencia con la base de datos proporcionada. La **Figura 26** ilustra las diferentes variables estimadas y presentadas en los diagramas de cajas y bigotes usados para el análisis estadístico de los resultados.

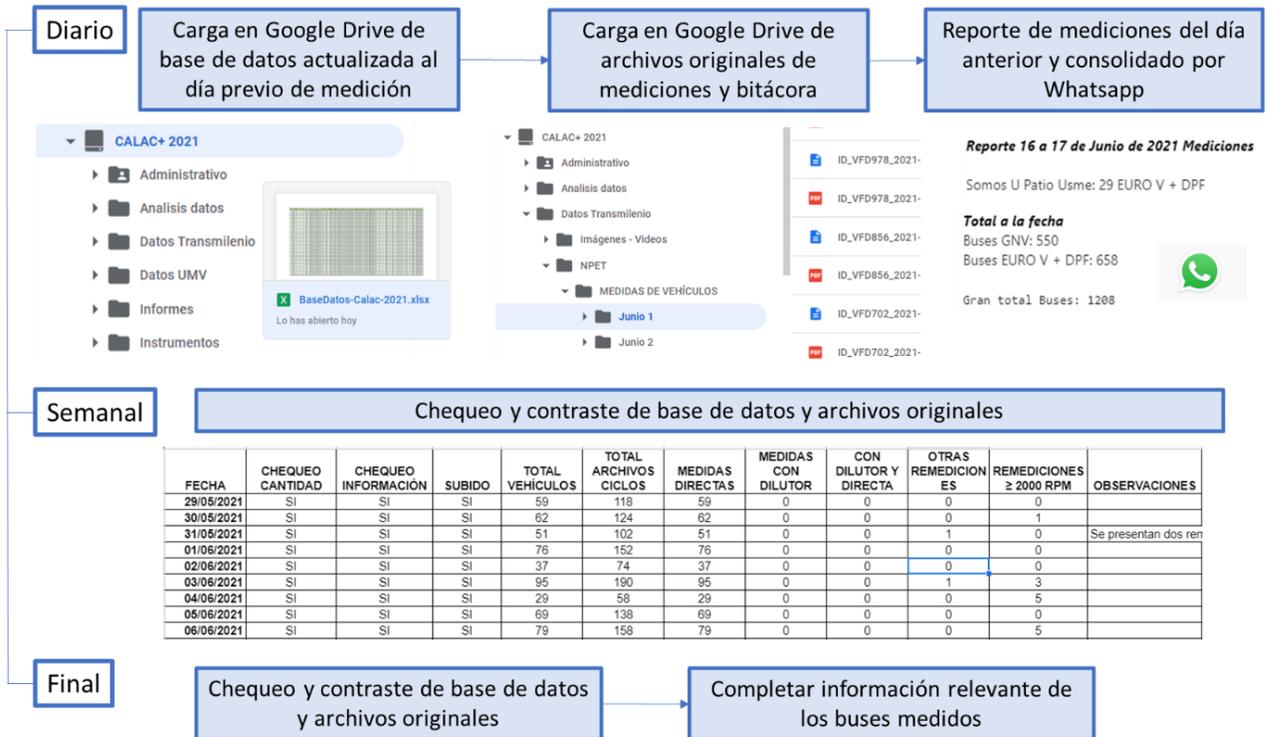


Figura 25. Diagrama del almacenamiento y tratamiento de datos durante la campaña de mediciones.

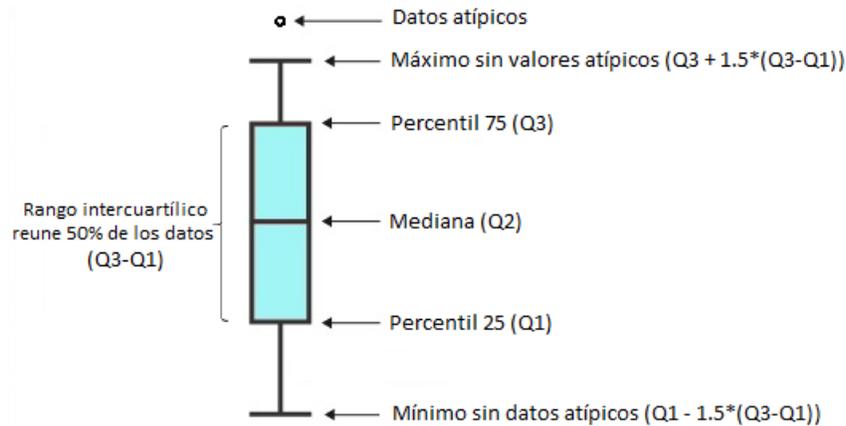


Figura 26. Descripción de información estadística presentada en los diagramas de cajas y bigotes.

## 5. Resultado y Análisis

### 5.1. Logística y procedimiento de medición

En los Anexos a este documento se presenta el *Instructivo Para Medición de Número de Partículas*, que describe en detalle el procedimiento utilizado para la medición de PN y se incluyen otros aspectos técnicos de la prueba según el tipo de vehículo de medición.

#### Logística

Se realizó la medición de los buses de dos formas:

- Medición fija (**Figura 27**): con el equipo ubicado bajo uno de los cárcamos de mantenimiento del patio y los buses desplazándose hasta el lugar de medición.
- Medición móvil (**Figura 28**): desplazando el equipo de medición hacia los buses parqueados.



**Figura 27.** Imágenes de medición fija en cárcamo de mantenimiento de buses.

La medición fija fue la más utilizada ya que no se veía afectada por las condiciones climáticas (lluvia o sol abundante), ni dependía del uso de un generador eléctrico para proveer de energía los equipos. La medición móvil se usó en casos especiales, donde no había personal disponible para movilizar los buses. En ambos casos, se recomienda la participación de 2

personas: una a cargo del manejo del *software* y otra a cargo del manejo de la sonda. Sin embargo, es posible realizar las mediciones sólo con 1 persona.



**Figura 28.** Imágenes de medición móvil en buses parqueados.

Se pudo medir de forma continua hasta 1 vehículo cada 2 minutos; esto se logró cuando había alta disponibilidad de conductores (entre 5 y 6) que garantizaran un flujo constante de vehículos. En el mejor de los casos fue posible medir 27 vehículos por hora durante 4 horas continuas (108 vehículos en 4 horas), siendo este un claro indicador de que el éxito de medir la mayor cantidad de vehículos depende en gran medida del apoyo brindado por las entidades encargadas de coordinar las actividades del lugar.

#### Procedimiento de la prueba

A continuación, se resumen algunos de los hallazgos más relevantes durante la realización de las pruebas:

- Chequear que no haya goteo de agua o líquidos en el tubo de escape, lo que indica que el vehículo no está suficientemente caliente.
- Verificar que no haya adaptaciones o roturas en el tubo de escape, ya que esto puede generar dilución de la emisión y alterar la medición.
- Introducir la sonda con cuidado en el centro del tubo de escape. No rozar con las paredes del tubo ya que allí se adhiere material particulado que puede desprenderse y alterar la medida o taponar el equipo.
- Sostener la sonda de medición con guantes de protección a alta temperatura, al ubicarla y retirarla, y en caso de que no se pueda sujetar la sonda al tubo de escape.

#### *Vehículos GNV:*

- Es estrictamente necesario que la temperatura del cárter sea mayor a 60°C para evitar emisiones de agua y vapor de agua por el tubo de escape que afecten el equipo de medición.

*Vehículos diésel con DPF*

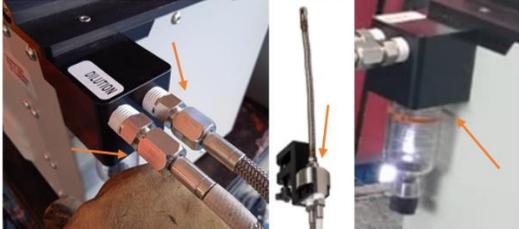
- No es necesario que el vehículo esté en la temperatura de operación, ya que el DPF debe eliminar >99% de las partículas.
- En algunos buses con resultado de emisión de PN entre 10.000 y 250.000 #/cm<sup>3</sup> se realizó una prueba al ralentí alto para comprobar el estado del DPF.

*Vehículos diésel sin DPF*

- Debido a la alta variabilidad en la emisión de estos vehículos, es estrictamente necesario que estén a la temperatura de operación para ser medidos.
- Es preciso realizar un chequeo preliminar de la emisión de PN con el NPET (acercando la sonda al tubo de escape). Si esta es menor a 3.000.000 #/cm<sup>3</sup> se procede a realizar la medición directamente. Si es mayor a este umbral, se adapta un dilutor para proteger el NPET.

## 5.2. Equipo de medición

A continuación, se presenta un resumen de la preparación y mantenimiento del equipo durante las mediciones en la **Figura 29**, y del mantenimiento general en la **Figura 30**. Para ver en detalle estos procedimientos, consultar el *Instructivo para Medición de Número de Partículas*, el manual de operación del equipo y su bitácora en los Anexos.

Preparación NPET antes de jornada de medición	Mantenimiento NPET durante mediciones
<ul style="list-style-type: none"><li>- Chequear ajuste de sonda, base de sonda y trampa de agua (5 minutos)</li><li>- Inspeccionar trampa de agua: que no contenga hollín o agua (1 minuto)</li><li>- Cargar cartucho con isopropanol, según manual del equipo (3 minutos)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cada 2 horas:<ul style="list-style-type: none"><li>• Recarga cartucho isopropanol (20 minutos)</li><li>• Inspección visual trampa de agua (1 minuto). Si es necesario, drenar o limpiar (10 minutos)</li></ul></li><li>- <u>Para vehículos sin DPF</u> Cada hora revisar que la punta de la sonda esté sin hollín</li></ul>
<p><i>Revisar ajuste de juntas y elementos roscados</i></p> 	<p><i>Presencia de hollín en trampa</i></p> 

**Figura 29.** Preparación y mantenimiento del NPET durante jornadas de medición.



Figura 30. Preparación y mantenimiento general del NPET.

Alarmas de error más comunes durante las mediciones:

- “Concentration low”: es común durante la medición del cero o en vehículos con PN muy bajo. No genera ningún inconveniente para continuar la medición.
- “CPC Flow error”: indica que puede haber fugas en alguna parte de la sonda o en la trampa de agua. Se debe verificar el correcto ajuste de estas. Debe desaparecer el error para continuar las mediciones.
- “Low pulse”: puede ser causado por la falta de isopropanol en el cartucho, indicando que se debe recargar. Si el error persiste se debe a exceso de humedad en el sistema, por lo que se deben cambiar el filtro de secado y los filtros HEPA, cambiar la espuma y el isopropanol, ya que pueden estar contaminados con agua. El error se debe corregir y desaparecer para continuar las mediciones.

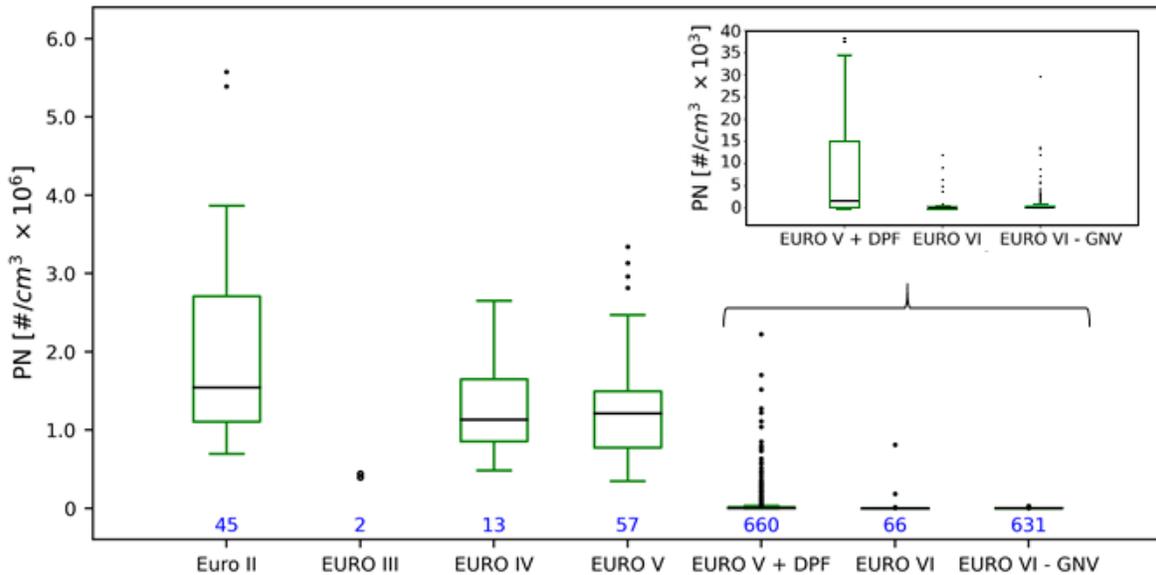
### 5.3. Emisión de PN

Los resultados de la emisión de PN según tecnología vehicular y combustible utilizado para todos los buses estudiados se presentan en la **Figura 31** y **Figura 32**, respectivamente.

Los buses diésel con tecnologías Euro II a Euro V, que no poseen sistemas de postratamiento de partículas, presentan las emisiones más altas de material particulado. El 75% de estos buses presentan emisiones de PN en el rango de 1.000.000 y 1.800.000  $\#/cm^3$ , específicamente aquellos con tecnología Euro II entre 1.000.000 y 2.600.000  $\#/cm^3$ , y Euro IV-V entre 800.000 y 1.600.000  $\#/cm^3$ . El valor más alto registrado fue de 5.576.111  $\#/cm^3$  en un bus Euro II modelo 2006.

Los buses diésel con DPF presentan una reducción de las emisiones de PN de hasta el 99.3% con respecto a aquellos sin DPF, el 75% de estos buses tiene una emisión menor a 12.500  $\#/cm^3$  (ver la **Figura 32**). La grafica de *zoom* en la **Figura 31**, permite evidenciar que los buses diésel con DPF adaptado (Euro V) presentan un rango de emisiones de PN mayor que aquellos con DPF de fábrica (Euro VI), lo cual se detallará en la sección 6.3.2.

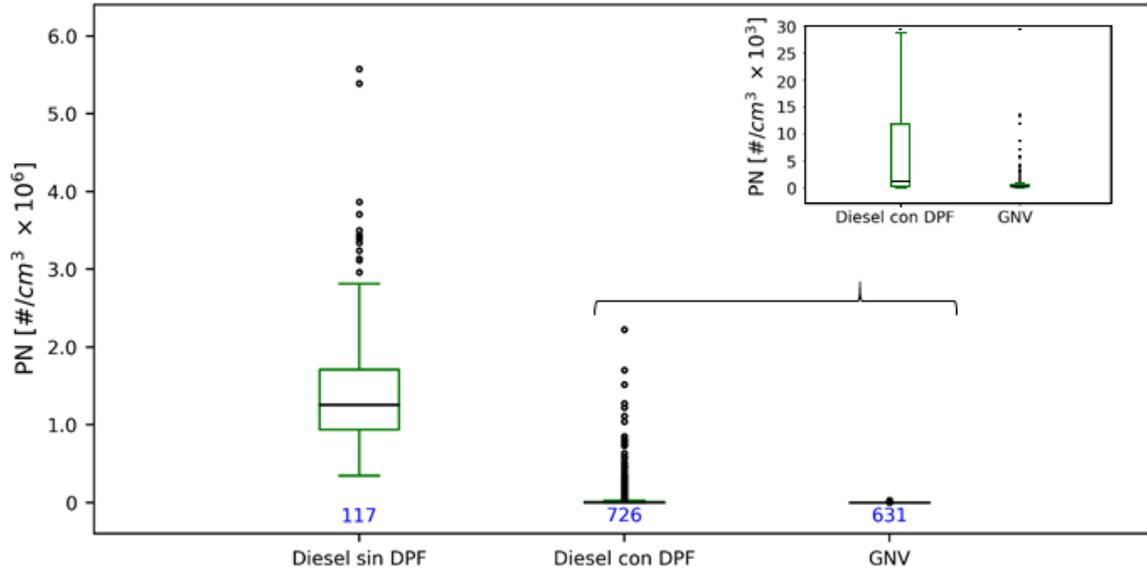
Las emisiones de PN más bajas las presentan los buses con tecnología Euro VI (diésel y GNV), como se observa en la gráfica de *zoom* en la **Figura 31** y la **Figura 32**. El 98% de estos buses presentan emisiones por debajo de 5000  $\#/cm^3$ .



**Figura 31.** Emisión de PN para todos los buses medidos según el estándar de emisiones que cumplen. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al *zoom* de las tecnologías de bajas emisiones de PM.

### Concentración de PN en el ambiente en zonas de medición

Como referencia, en la **Tabla 7** se presenta el valor promedio, mínimo y máximo de la concentración de PN en el ambiente en los diferentes lugares de medición. Algunos valores máximos de medición de PN en el ambiente mayores a 10.000  $\#/cm^3$  pueden ser producto al movimiento de buses inmediatamente antes de la medición, o a la concentración de estas partículas en los cárcamos de medición. Se observaron concentraciones de PN variables durante el día y en días diferentes en un mismo patio de medición. Algunos patios con amplia ventilación y en las afueras de la ciudad, como el patio 10 (ver **Figura 33**), presentaron concentraciones de PN muy bajas.



**Figura 32.** Emisión de PN para todos los buses medidos según combustible que utiliza. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al zoom de las tecnologías de bajas emisiones de PM.



**Figura 33.** Imágenes del patio 10 a las afueras de la ciudad.

En general, las concentraciones de PN en el aire ambiente estuvieron entre 1000 y 6000  $\#/cm^3$ , en un nivel similar o incluso más alto que las emisiones obtenidas en buses diésel con DPF o con combustible GNV.

**Tabla 7. Concentración de PN en el ambiente en las diferentes zonas de medición**

Patio	PN ambiente (#/cm <sup>3</sup> )		
	Min	Max	Promedio
1	685	14.623	5.572
2	506	10.324	3.387
3	813	8.679	2.742
4	1.054	6.723	2.538
5	3.557	13.563	6.989
6	604	11.149	6.806
7	1.018	9.357	4.321
8	481	3.656	1.616
9	231	1.587	718
10	207	1.768	962
11	1.347	2.886	2.002

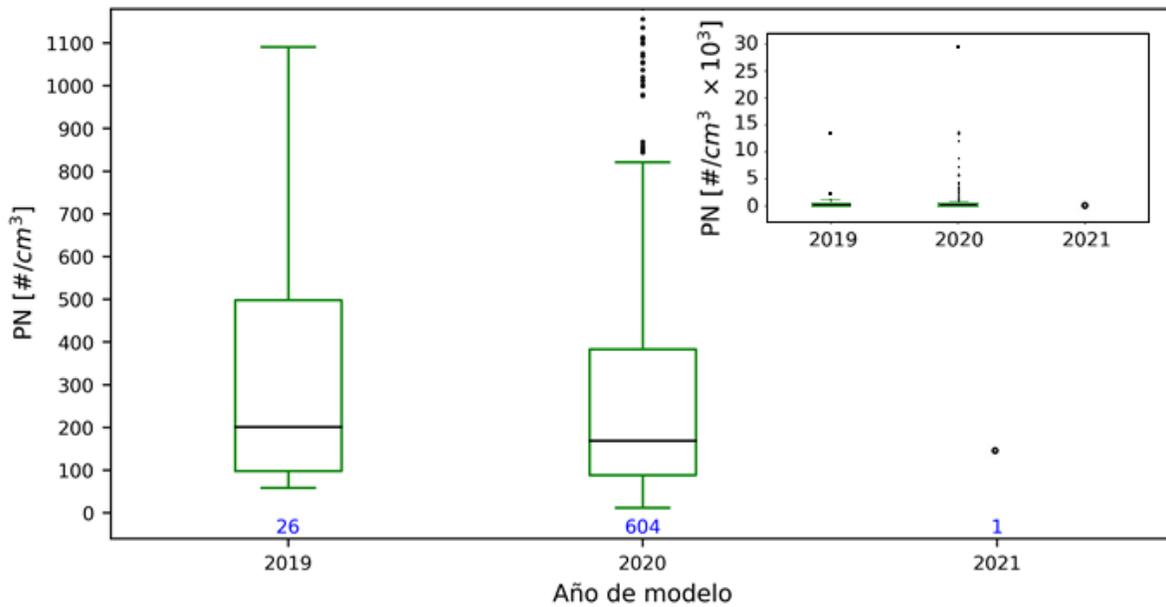
### 5.3.1. Vehículos GNV

Los resultados de emisión de PN por parte de los buses Euro VI con combustible GNV, según el año modelo, el kilometraje del vehículo y la cilindrada, se presentan en la **Figura 34**, la **Figura 35** y la **Figura 37**, respectivamente.

En general, los resultados de emisión de PN de este tipo de vehículos es muy baja (<1100 #/cm<sup>3</sup>), e inferior a la concentración de PN en el ambiente (ver la **Tabla 7**). Hay que ser cuidadosos con este resultado, ya que varios estudios han encontrado que los vehículos que usan GNV tienen altas emisiones de PN de tamaños inferiores a 23 nm [23], [32], que no serían detectadas por el NPET.

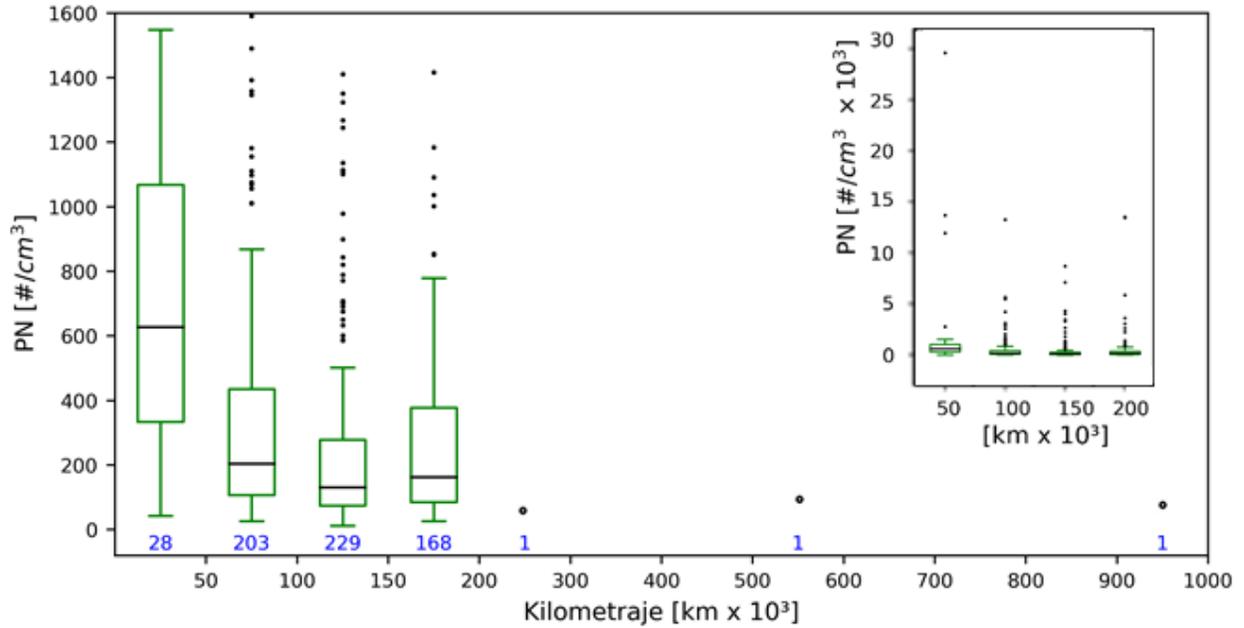
No se observa una diferencia significativa en la emisión de los vehículos modelo 2019 y 2020 (**Figura 34**). Sin embargo, al revisar el kilometraje (**Figura 35**) se encontró una ligera tendencia a mayor emisión en los buses con el menor kilometraje (26.000 < km < 50.000). Haciendo una revisión de estos buses (28 en total), se encontró que 3 de ellos tienen emisiones entre 10.000 y 30.000 #/cm<sup>3</sup>, todos medidos en el patio 10, como se presenta en la **Tabla 8**. También se detectaron 4 buses de mayor kilometraje con emisiones mayores a 10.000 #/cm<sup>3</sup>. Solo uno de los buses presenta una emisión atípica cercana a 30.000 #/cm<sup>3</sup>, sugiriendo que, a pesar de su bajo kilometraje, puede requerir de una inspección mecánica.

Tabla 8. Listado de buses Euro VI a GNV con emisión de PN mayor a 10.000 #/cm <sup>3</sup>					
ID bus	Modelo	Kilometraje	Tipo	Patio	PN (#/cm <sup>3</sup> )
GNV 1	2020	72.172	Bi-articulado	7	13.264
GNV 2	2019	160.786	Articulado	1	13.447
GNV 3	2020	161.621	Articulado	1	13.530
GNV 4	2020	161.432	Articulado	1	13.468
GNV 5	2020	30.931	Padrón	10	11.955
GNV 6	2020	30.287	Padrón	10	13.693
GNV 7	2020	27.845	Padrón	10	29.589

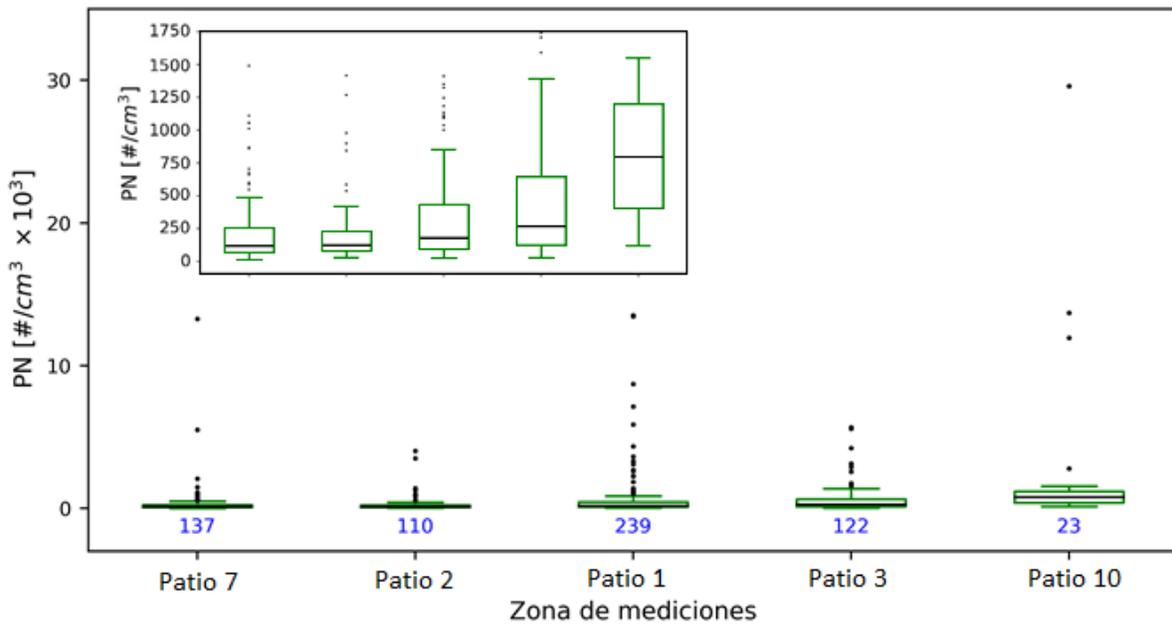


**Figura 34.** Emisión de PN buses Euro VI a GNV según año de fabricación. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada año modelo.

La **Figura 36** muestra los resultados de emisión de PN de los buses en cada patio. Aunque no se presentan diferencias significativas entre los patios, se evidencia que los buses del patio 10 tienen una emisión ligeramente mayor. Sin embargo, se resalta que las emisiones de PN son supremamente bajas, como se observa en la gráfica de zoom en la **Figura 36**, y similares o incluso inferiores a la concentración típica del ambiente (ver la **Tabla 7**).



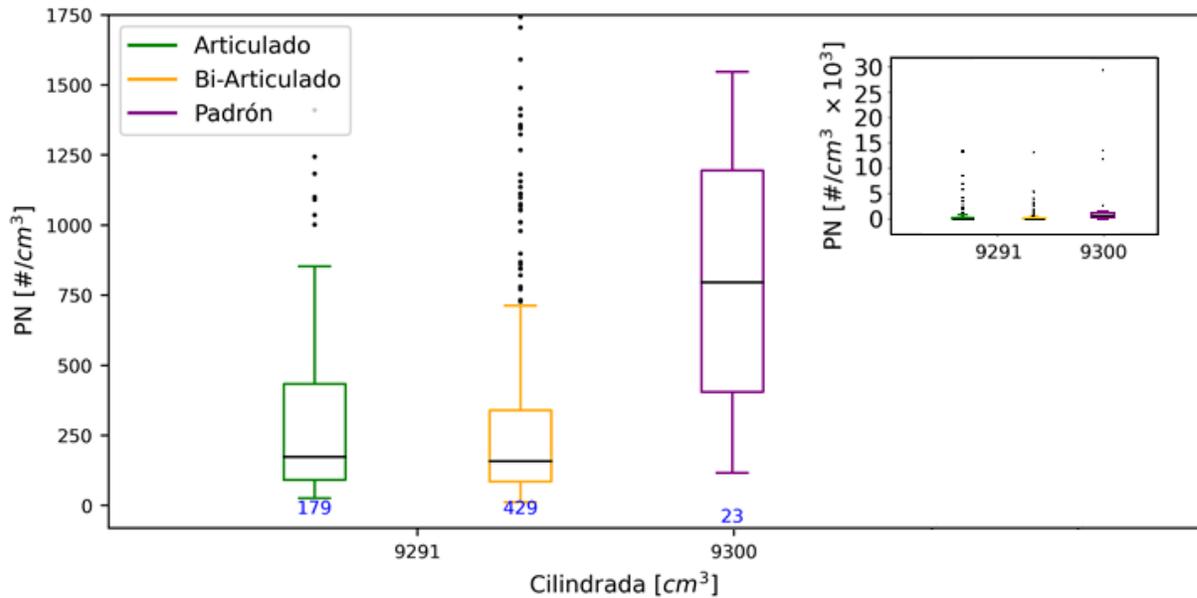
**Figura 35.** Emisión de PN buses Euro VI a GNV según kilometraje recorrido. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para los kilometrajes más representativos.



**Figura 36.** Emisión de PN buses Euro VI a GNV en cada zona de medición. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al zoom de emisión PN medido para cada patio.

Finalmente, se observa que la cilindrada de estos buses es igual, la diferencia radica en el tipo de bus. Los buses articulados y biarticulados tienen un nivel de emisión similar,

mayoritariamente menor a  $500 \text{ \#/cm}^3$ , mientras que los padrones muestran un nivel de emisión ligeramente más alto, pero igualmente bajo, generalmente menor a  $1250 \text{ \#/cm}^3$ .



**Figura 37.** Emisión de PN buses Euro VI a GNV según cilindrada, diferenciado entre tipo de bus: articulado, biarticulado y padrón. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada cilindrada.

La baja emisión de PN encontrada para todos los vehículos Euro VI a GNV da un indicio de que en el rango de medición del equipo usado (23 – 1000 nm) no se pueden observar diferencias o anomalías para estos buses. Como se sugiere en la literatura científica, es necesario evaluar la emisión de PN en rangos de tamaño de partículas inferiores a 23 nm para esta tipología de vehículos.

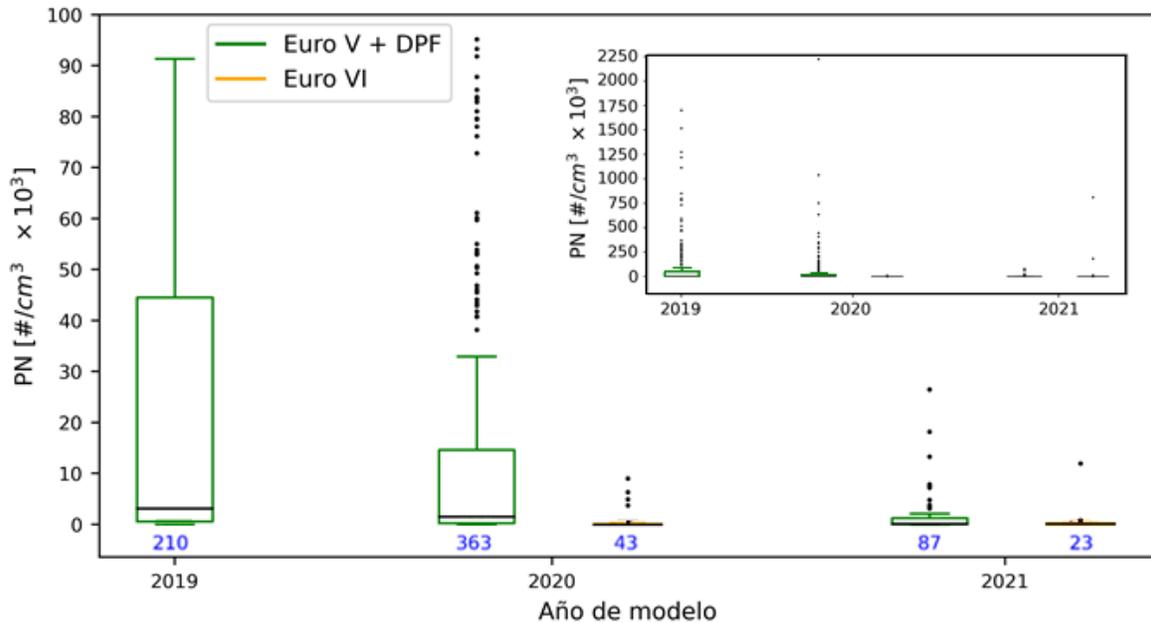
### 5.3.2. Vehículos diésel con DPF

Los resultados de emisión de PN por parte de los buses diésel Euro VI con DPF de fábrica y Euro V con DPF adaptado, según el año modelo, el kilometraje del vehículo y la cilindrada, se presentan en la **Figura 38**, la **Figura 39** y la **Figura 40** respectivamente.

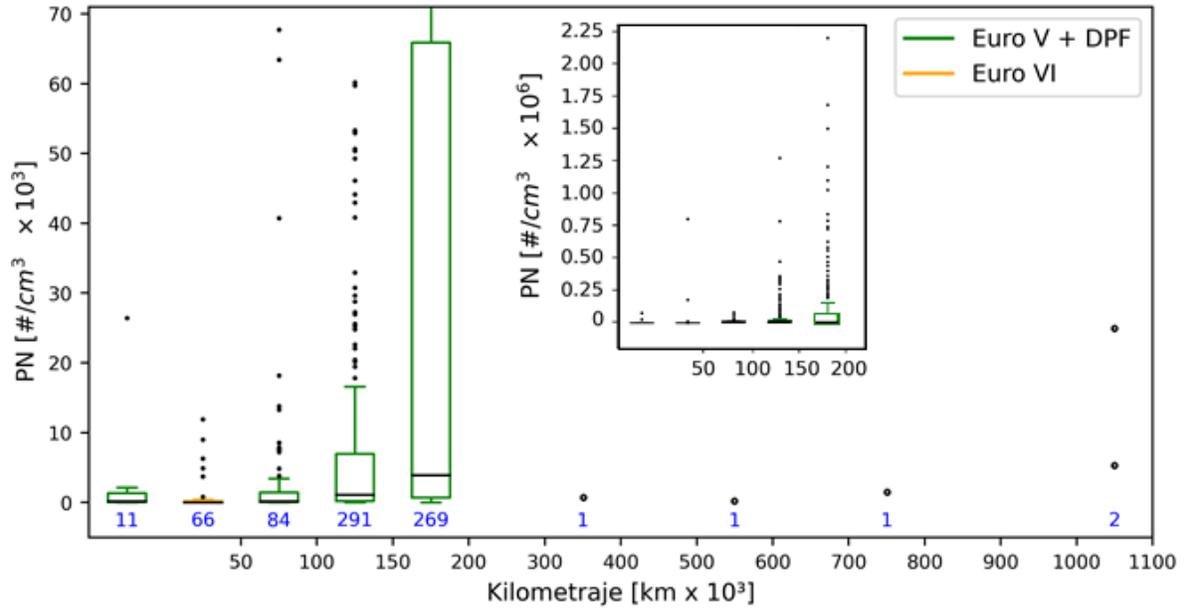
La **Figura 38** muestra que la emisión de PN de estos buses es baja, con una mediana menor a  $5.000 \text{ \#/cm}^3$  para todos los modelos evaluados. Sin embargo, los buses Euro V con DPF adaptado modelo 2019 y 2020 presentan valores de PN más altos. El tercer cuartil Q3 (reúne el 75% de los datos) de los valores de emisión de PN de estos buses es aproximadamente de  $40.000 \text{ \#/cm}^3$  para los modelos 2019 y de  $15.000 \text{ \#/cm}^3$  para los modelos 2020. También se observa, para estos buses, un aumento de los valores máximos de emisión y de la cantidad de buses con valores atípicos altos, a medida que aumenta la antigüedad. Este efecto no se observa en los buses Euro VI modelo 2020 y 2021, en los que la mayoría de los buses tiene emisiones igualmente bajas. Esta tendencia se relaciona con el kilometraje recorrido (ver la **Figura 39**), ya que a mayor kilometraje se encuentran más buses con emisiones mayores a la

mediana y valores de emisión atípica más altos. Los valores atípicos altos están relacionados con el daño o fallo del DPF.

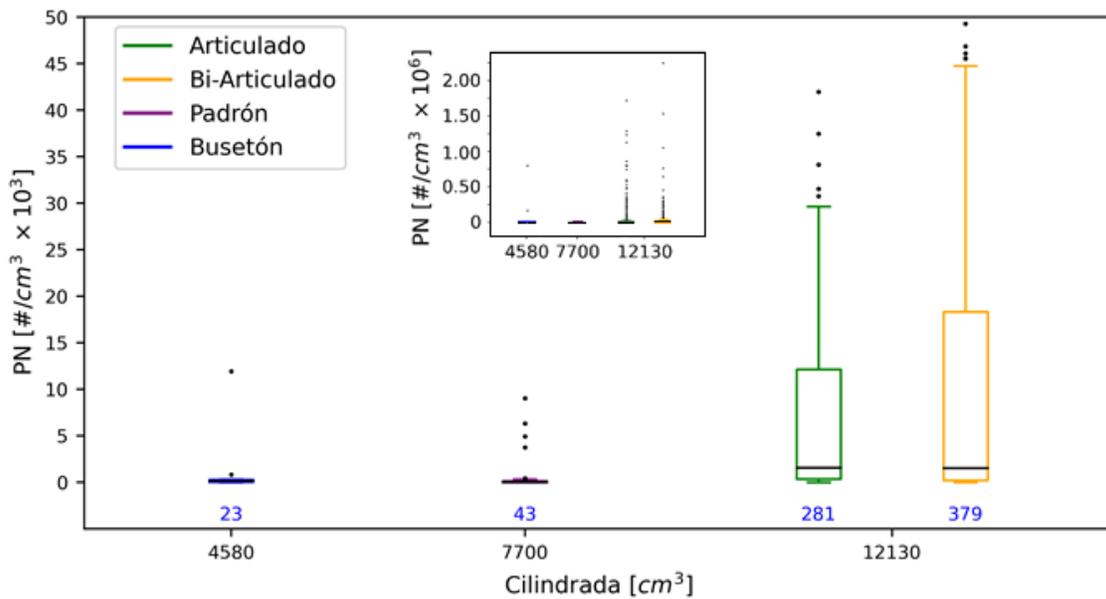
Comparando los buses con DPF según la cilindrada o tipo (**Figura 40**) se observa que los buses con mayores emisiones son los de mayor cilindrada: articulados y biarticulados. Cabe anotar que todos los busetones son diésel Euro VI modelo 2021 que no han entrado a circulación, y tienen recorrido inferior a 600 km. Los buses padrón también son todos Euro VI modelo 2020 con recorrido inferior a 40.000 km.



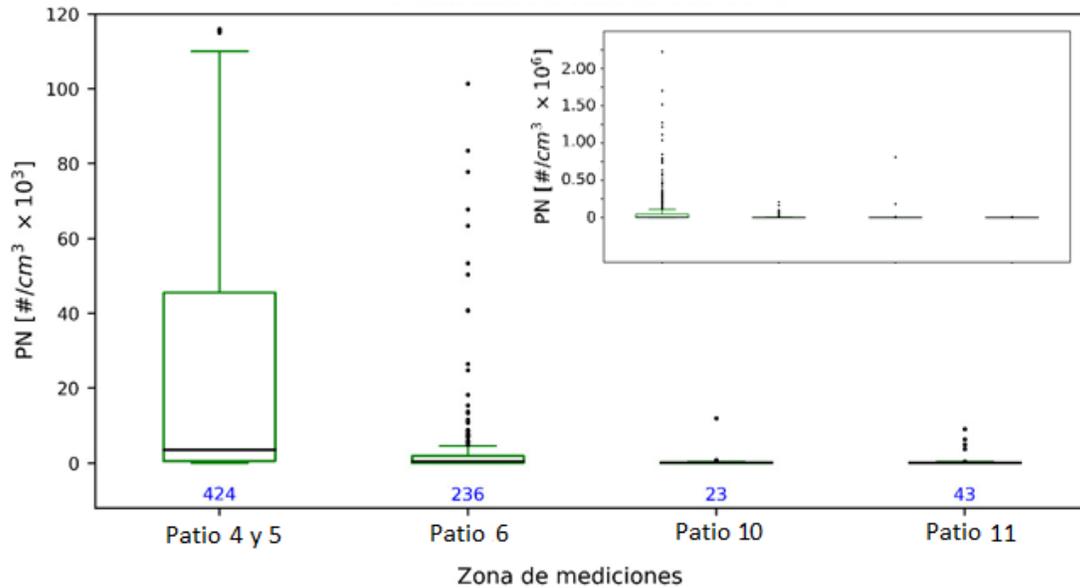
**Figura 38.** Emisión de PN buses diésel con DPF según año de fabricación, discriminado por tecnología Euro V y Euro VI. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada año modelo.



**Figura 39.** Emisión de PN buses diésel con DPF según kilometraje recorrido, discriminado en Euro V y Euro VI. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para los kilometrajes más representativos.



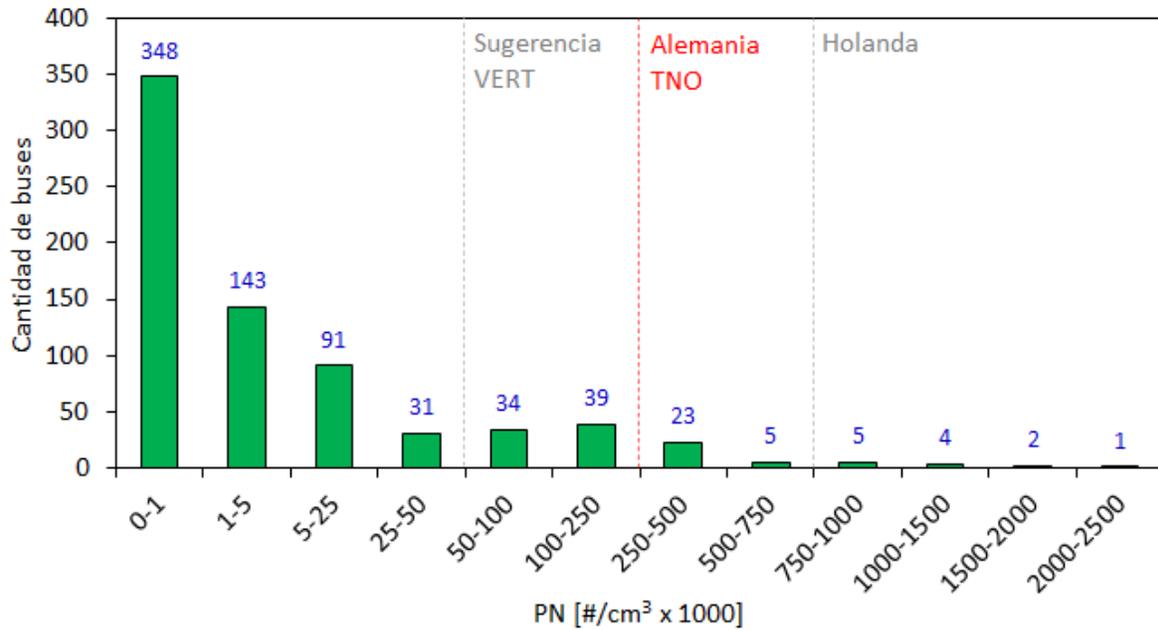
**Figura 40.** Emisión de PN buses diésel con DPF según cilindrada, diferenciado entre tipo de bus: articulado, bi-articulado y padrón. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado muestra el rango total de PN medido para cada cilindrada.



**Figura 41.** Emisión de PN buses diésel DPF en cada zona de medición. El número azul corresponde a la cantidad de buses. El gráfico insertado corresponde al rango total de emisión PN medido para cada patio.

### 5.3.2.1. Vehículos diésel con fallo en DPF

El límite establecido por Holanda para definir que el DPF presenta daños es  $1.000.000 \text{ \#/cm}^3$ , en Alemania y según recomendación de TNO es  $250.000 \text{ \#/cm}^3$ , VERT además asegura que a partir de  $50.000 \text{ \#/cm}^3$  se debe hacer mantenimiento al DPF porque puede estar dañado o funcionando de forma deficiente. La **Figura 42** muestra la cantidad de buses con filtro DPF en diferentes rangos de emisión de PN. Se encontró que 40 buses emiten más de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí bajo, indicando fallo en el DPF; de estos, 7 presentaron emisión mayor a  $1.000.000 \text{ \#/cm}^3$ . También se encontraron 73 buses a los cuales, según la recomendación de VERT, se les debería realizar mantenimiento al DPF ya que emitieron entre  $50.000$  y  $250.000 \text{ \#/cm}^3$ .



**Figura 42.** Distribución de vehículos con DPF según su emisión de PN. El número azul corresponde a la cantidad de buses, y el verde al porcentaje del total.

El listado de los 40 buses con filtro DPF averiado se presenta en la **Tabla 9**. Solo 1 de estos buses es Euro VI con filtro de fábrica, tipo busetón (capacidad 10700 kg), marca Volkswagen, que aún no ha entrado en circulación en el sistema TransMilenio. Los 39 buses restantes son Euro V con filtro DPF adaptado marca Volvo, y equivalen al 6% de todos los buses en esta categoría. De estos buses, 27 (69%) son modelo 2019 y 12 (31%) modelo 2020; 25 (64%) articulados, 14 (36%) biarticulados.

**Tabla 9.** Listado de buses diésel con DPF con emisión de PN mayor a 250.000 #/cm<sup>3</sup>

ID	Patio	Tipo de bus	Nivel emisión	Marca	Modelo	Kilometraje	PN (#/cm <sup>3</sup> )
DPF 1	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	146.579	250.579
DPF 2	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	179.143	257.443
DPF 3	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	168.031	263.215
DPF 4	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	168.643	272.701
DPF 5	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	198.323	279.005
DPF 6	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	176.706	284.563
DPF 7	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	174.558	285.334
DPF 8	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	119.341	288.427
DPF 9	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	142.774	290.679
DPF 10	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	182.928	299.489
DPF 11	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	122.919	309.840
DPF 12	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	130.306	310.260
DPF 13	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	172.348	320.312
DPF 14	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	135.351	323.968
DPF 15	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	126.378	335.112
DPF 16	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	176.589	337.878

DPF 17	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	136.135	338.192
DPF 18	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	128.892	351.264
DPF 19	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	154.220	369.800
DPF 20	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	170.291	406.845
DPF 21	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	180.789	444.942
DPF 22	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	130.118	464.835
DPF 23	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	170.380	476.422
DPF 24	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	165.793	516.479
DPF 25	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	166.007	565.553
DPF 26	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	164.977	590.208
DPF 27	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	180.966	633.428
DPF 28	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	156.876	732.554
DPF 29	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	177.840	751.520
DPF 30	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	149.024	780.696
DPF 31	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	169.123	797.451
DPF 32	10	Busetón	EURO VI	VOLKSWAGEN	2021	1.115	811.088
DPF 33	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	166.508	849.166
DPF 34	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	162.340	1.038.255
DPF 35	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	170.708	1.112.543
DPF 36	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	171.229	1.219.026
DPF 37	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	147.365	1.273.610
DPF 38	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	165.958	1.516.583
DPF 39	4 y 5	ARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2019	165.102	1.701.481
DPF 40	4 y 5	BIARTICULADO	EURO V - DPF	VOLVO	2020	174.618	2.225.123

Para evaluar los límites adecuados y determinar si el DPF está fallando o si requiere mantenimiento, se realizaron pruebas en ralentí alto a algunos de los buses con DPF que presentaban emisiones mayores a  $5.000 \text{ \#/cm}^3$  y menores al límite de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$ . Los resultados se presentan en la **Figura 43**. Los buses que tienen emisión de PN menor a  $25.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí bajo no superaron el límite de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí alto. Los buses que tienen emisión entre  $25.000$  y  $70.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí bajo, algunos superaron el límite de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  y algunos no. Todos los buses que emitieron más de  $70.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí bajo, superaron el límite de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí alto, aunque no superaron  $1.000.000 \text{ \#/cm}^3$ . Se realizó la medición de 1 bus que emitió más de  $100.000 \text{ \#/cm}^3$  en ralentí bajo y su emisión al ralentí alto fue mayor a  $1.000.000 \text{ \#/cm}^3$ . Por esta razón y para evitar la saturación del NPET no se realizaron mediciones al ralentí alto a buses que superaran  $100.000 \text{ \#/cm}^3$  en ralentí bajo. Además, entre los buses que superaban el límite de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  algunos no tenían evidencia de hollín en el tubo de escape.

Los buses 41 y 42 presentaban indicios de regeneración del DPF durante la prueba, el testigo que indica la regeneración no estaba funcionando y el conductor por su experiencia consideró que las elevadas revoluciones del vehículo podrían indicarlo. A estos vehículos, aunque no presentaban emisiones elevadas en ralentí bajo ( $<10.000 \text{ \#/cm}^3$ ), se les realizó

una prueba al ralentí alto, mostrando emisiones cercanas o mayores a  $100.000 \text{ \#/cm}^3$ . Es importante garantizar que el vehículo no esté en regeneración de DPF durante la prueba.

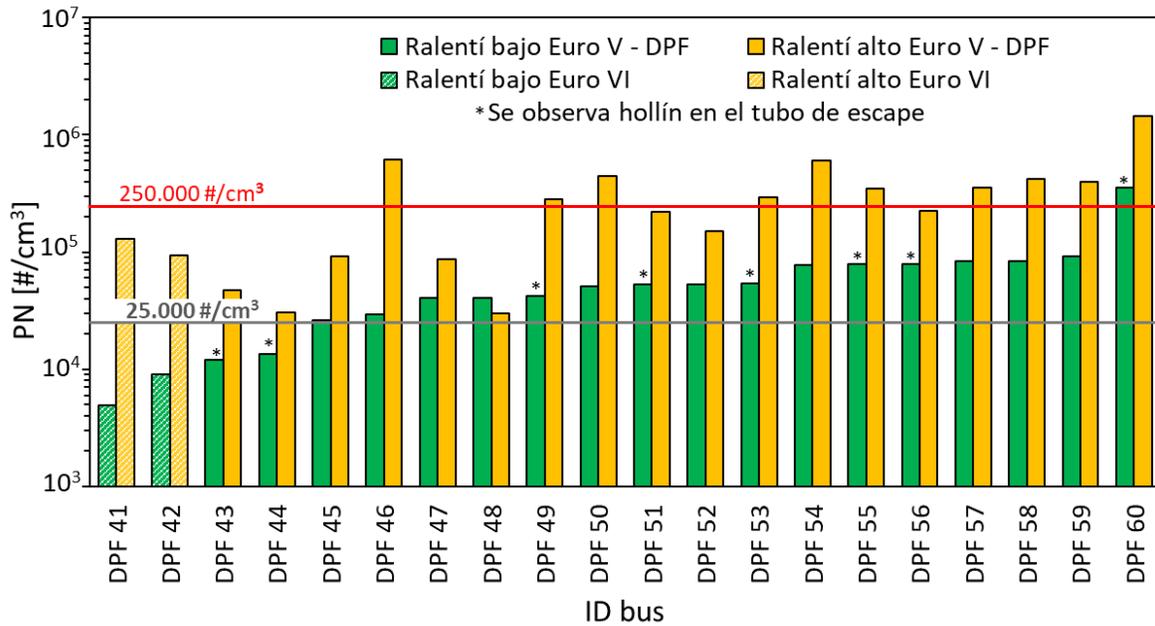


Figura 43. Emisión de PN buses diésel DPF al ralentí bajo y ralentí alto.

Estos resultados indican que buses que emiten entre  $25.000$  y  $100.000 \text{ \#/cm}^3$  podrían requerir mantenimiento del DPF. Sin embargo, los buses que emiten más de  $100.000$  es muy posible que presenten fallos. Se recomienda que a todos los buses que superen una emisión de  $25.000 \text{ \#/cm}^3$  al ralentí bajo se les realice medición al ralentí alto que permitan comprobar el correcto funcionamiento del DPF; a aquellos que en la prueba al ralentí alto emitan más de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  se les recomiende el mantenimiento del DPF; aquellos que en la prueba al ralentí bajo o alto emitan más de  $250.000 \text{ \#/cm}^3$  se consideren con fallo en el DPF.

Se observa que, los vehículos diésel Euro V con fallo en el DPF, todos pertenecen al patio 4 y 5. Se exploró la influencia de la operación y mantenimiento de los buses por diferentes patios, teniendo en cuenta la diferencia de modelos y kilometraje acumulado por los buses, los resultados se presentan en la **Tabla 10**. Comparando los buses del año 2020, se observa un mayor porcentaje de buses con fallo en el DPF en el patio 4 y 5 en comparación con el patio 10, sin existir diferencias importantes en el kilometraje recorrido por los buses entre los patios.

		Patio 4 y 5	Patio 10
2019	Total buses	210	-
	70 – 250 ( $\text{\#/cm}^3 \times 1000$ )	24 (11%)	-
	>250 ( $\text{\#/cm}^3 \times 1000$ )	27 (13%)	-
	Km promedio	170.255	-

2020	Total buses	214	149
	70 – 250 (#/cm <sup>3</sup> x 1000)	30 (14%)	4 (3%)
	>250 (#/cm <sup>3</sup> x 1000)	12 (6%)	-
	Km promedio	158.266	133.844
2021	Total buses	-	87
	70 – 250 (#/cm <sup>3</sup> x 1000)	-	1 (1%)
	>250 (#/cm <sup>3</sup> x 1000)	-	-
	Km promedio	-	55.426

### 5.3.3. Vehículos diésel sin DPF

Los resultados de emisión de PN por parte de los buses diésel sin DPF: Euro II, III, IV y V, según el año modelo, el kilometraje del vehículo y la cilindrada, se presentan en la **Figura 44**, la **Figura 45** y la **Figura 47**, respectivamente.

La **Figura 44** permite establecer que las emisiones de PN del 75% de los vehículos sin filtros DPF son inferiores a 4.500.000 #/cm<sup>3</sup>, con valores tan bajos como 345.529 #/cm<sup>3</sup> (Euro V) y tan alto como 5.576.111 #/cm<sup>3</sup> (Euro II). No se observa una diferencia estadísticamente significativa en la emisión de PN de estos buses según su tecnología de emisión. Los buses Euro II modelo 2004 presentaron las emisiones más altas, con una mediana de 2.100.000 #/cm<sup>3</sup>. Los demás buses Euro II, III, IV y V, modelos 2005 a 2019 no presentan diferencias significativas en su emisión de partículas con medianas entre 1.200.000 y 1.500.000 #/cm<sup>3</sup>. Los buses Euro V modelo 2020 presentan todas las emisiones inferiores a 1.000.000 #/cm<sup>3</sup>.

Al evaluar el impacto del kilometraje recorrido, **Figura 45**, no se observa un aumento en la emisión de PN al aumentar el kilometraje de los buses. Incluso 2 buses Euro III y 1 Euro IV con kilometraje superior a 1 millón, tienen emisión de PN inferior a 500.000 #/cm<sup>3</sup>. Esto indica que el kilometraje y tecnología del vehículo no son determinantes en sus emisiones de PN, como fue observado también en un estudio realizado por VERT en Israel en 2015 de 6 buses [34]. La comparación con estos resultados se presenta en la **Figura 46**.

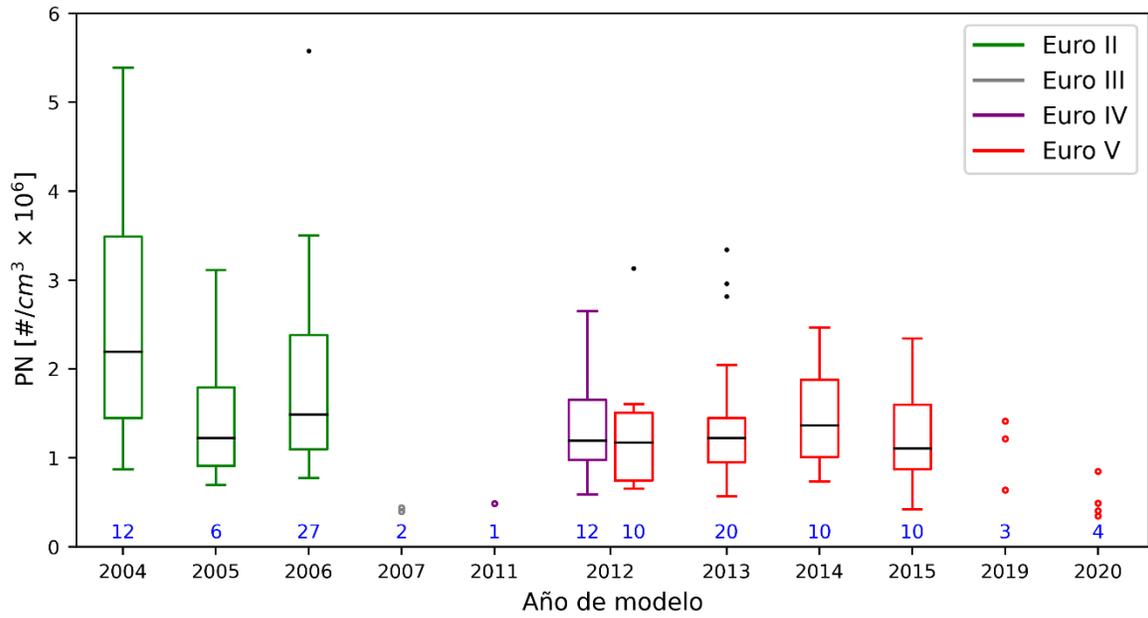


Figura 44. Emisión de PN buses diésel sin DPF según año de fabricación, discriminado por tecnología Euro II, III, IV y V.

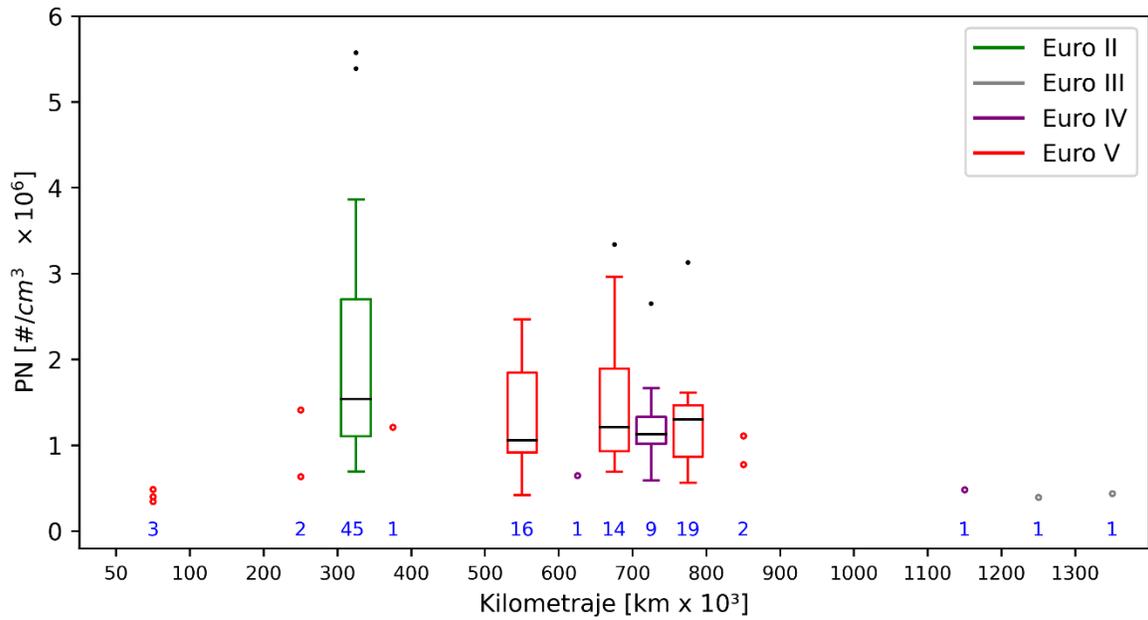
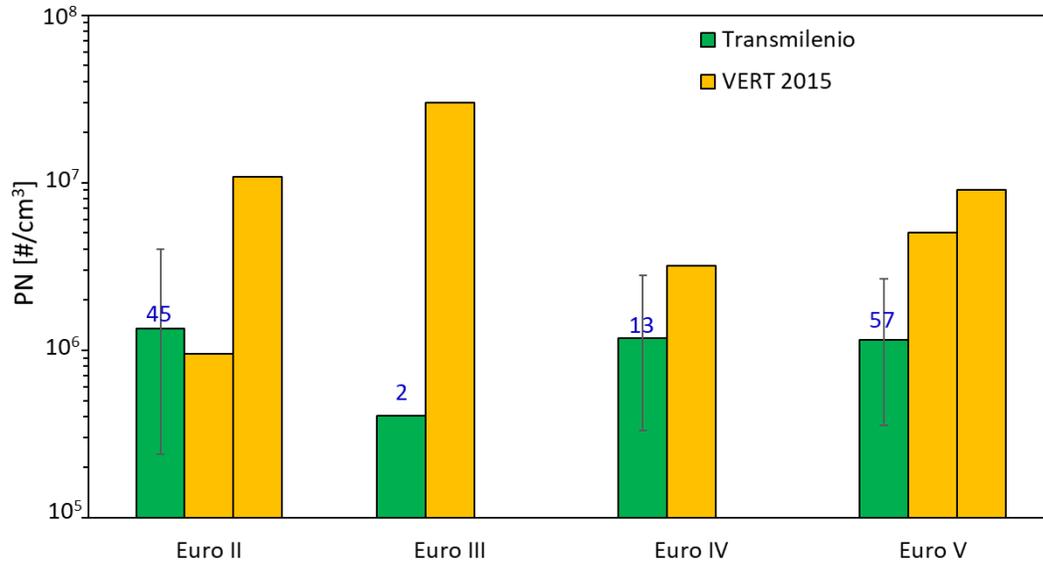
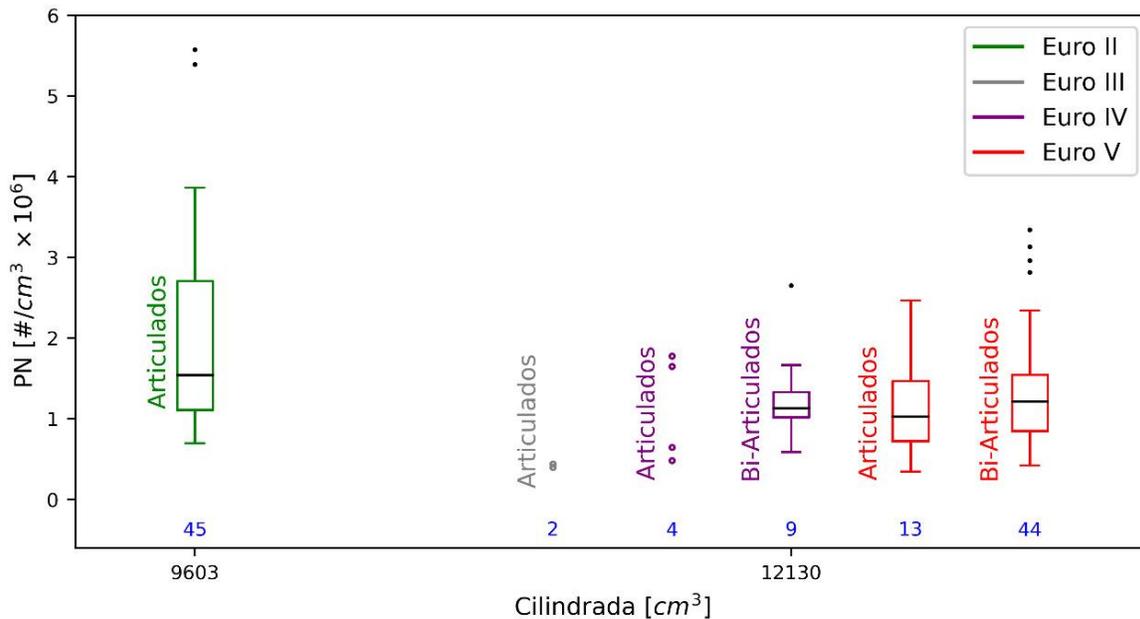


Figura 45. Emisión de PN buses diésel sin DPF según kilometraje recorrido, discriminado por tecnología Euro II, III, IV y V.

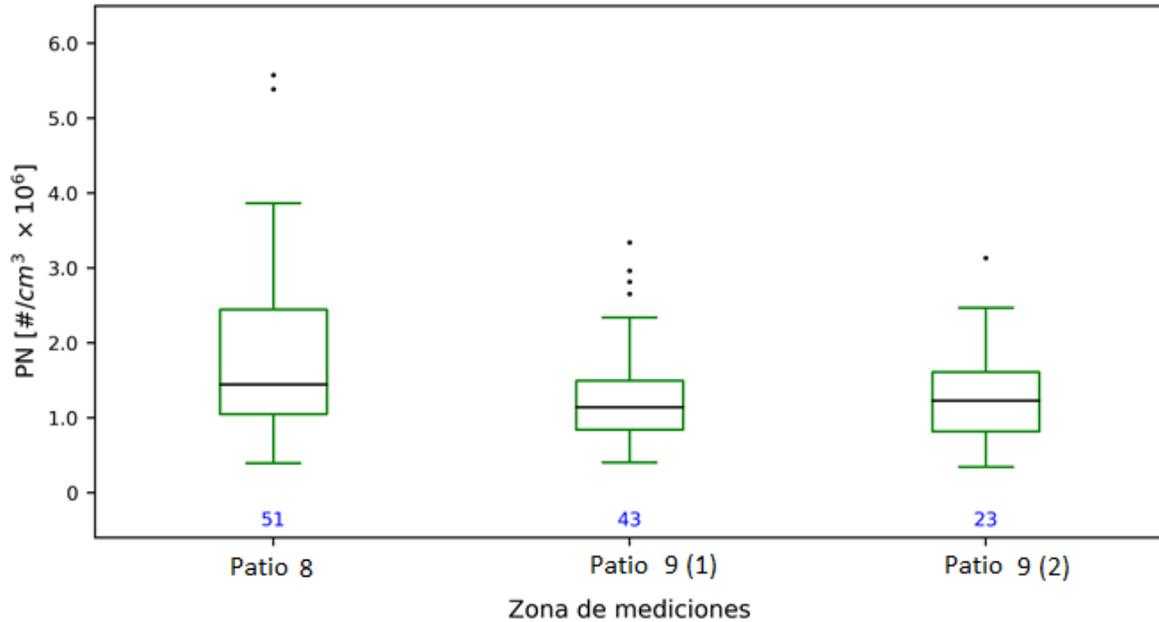


**Figura 46.** Comparación de emisión de PN en buses sin DPF: Transmilenio y medidos por VERT [34]. El valor de la barra verde corresponde a la mediana y la barra de error al tercer y primer cuartil.

Al igual que la tecnología y el kilometraje, la cilindrada o tipo de bus no tiene impacto en la emisión de PN de los buses, como lo muestra la **Figura 47**. La verificación del estado de mantenimiento de los buses según el patio de medición (**Figura 48**), no muestra diferencias significativas entre los patios. El patio 8 presenta buses con emisión superior a 2.000.000 #/cm<sup>3</sup>, esencialmente porque la totalidad de los buses Euro II se midieron en este patio.



**Figura 47.** Emisión de PN buses diésel sin DPF según cilindrada, discriminado por tecnología Euro II, III, IV y V.



**Figura 48.** Emisión de PN buses diésel sin DPF en cada zona de medición. El gráfico insertado corresponde al zoom de emisión PN medido para cada patio.

#### 5.3.4. Impacto de límites de aprobación

La **Figura 49** y la **Figura 50** presentan un gráfico acumulativo de la emisión de PN en los vehículos estudiados con tecnologías de bajas (Euro V+DPF, Euro VI) y altas (Euro II, III, IV y V) emisiones de PN, respectivamente. Estas gráficas permiten establecer el impacto que tendría en la aprobación de una prueba al ralentí con diferentes límites de emisión de PN.

Entre los buses con tecnología de bajas emisiones de PN (**Figura 49**) se observa que los buses diésel tienen una mayor diversidad en emisiones. Los buses Euro VI a GNV tienen un cambio de pendiente pronunciado en la curva acumulativa de emisiones, indicando que la mayoría de estos buses tienen un rango estrecho de emisión de PN entre 200 y 5000  $\#/cm^3$ . Los buses EURO V con DPF adaptado tienen la mayor cantidad de buses con emisiones mayores a 1000  $\#/cm^3$ , y los diésel Euro VI la mayor cantidad de buses con emisiones menores a 100  $\#/cm^3$ .

En la **Tabla 11** se presentan los porcentajes de aprobación de buses para las diferentes tecnologías dependiendo del límite de emisión. Para todos estos buses los porcentajes de aprobación estarían por encima del 90% con límites de 250.000  $\#/cm^3$  en adelante. Incluso para el límite estricto sugerido por VERT de 50.000  $\#/cm^3$  la aprobación sería del 83% para Euro V con DPF adaptado y 97% Euro VI diésel. La totalidad de los buses a GNV aprobarían con cualquiera de estos límites.

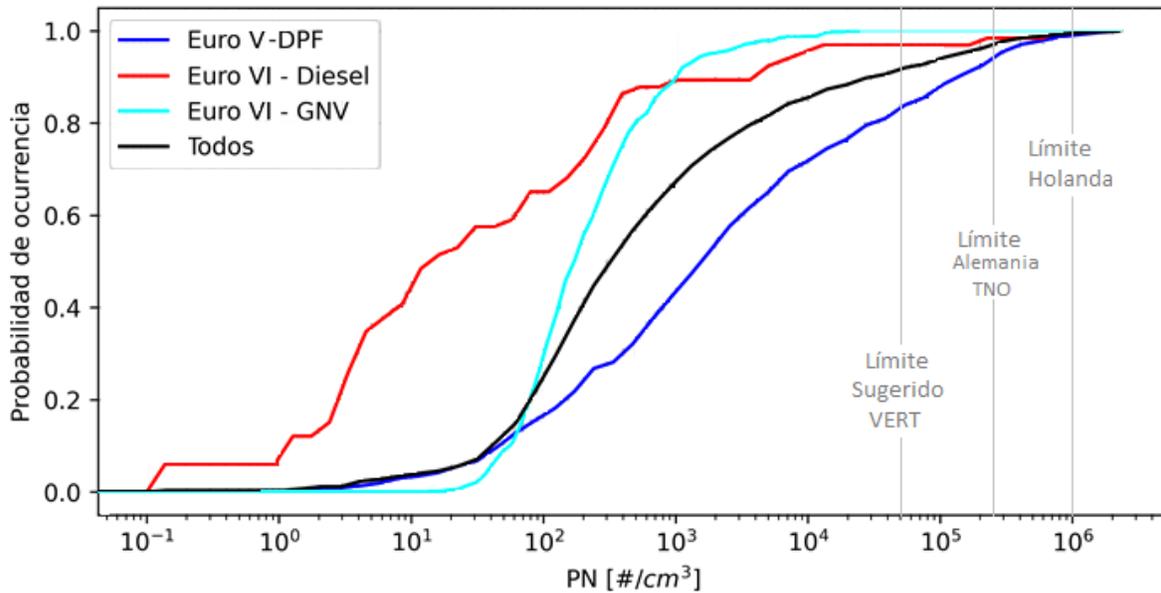


Figura 49. Impacto del límite de aprobación en vehículos diésel con DPF (Euro V y Euro VI) y vehículos Euro VI a GNV.

Tabla 11. Porcentaje de aprobación de buses con tecnologías de bajas emisiones de PN con diferentes límites de emisión

Límite de PN (#/cm <sup>3</sup> )	Euro V + DPF (660)	Euro VI diésel (66)	Euro VI GNV (631)	Todos (1357)
50.000 (Sugerido VERT)	83%	97%	100%	92%
250.000 (Alemania y TNO)	94%	98%	100%	97%
1.000.000 (Holanda)	99%	100%	100%	99%

Los buses con tecnología de altas emisiones de PN (Figura 50), presentan curvas de emisión acumulativa similares, casi idénticas para buses Euro IV y Euro V, y un poco avanzada hacia emisiones más altas para buses Euro II. Se explicó antes que en buses diésel sin DPF la tecnología no influía en la emisión de PN.

La Tabla 12 muestra los porcentajes de aprobación de las categorías vehiculares para diferentes límites propuestos. El límite más estricto, de 1.000.000 #/cm<sup>3</sup>, sugerido por VERT, tendría aprobaciones muy bajas, menores a 37%, especialmente en buses Euro II, con 18%. Particularmente los buses Euro II presentan los porcentajes de aprobación más bajos. Es de gran interés observar que los límites impuestos a camiones y volquetas diésel en los pilotos

del AMVA, resultan en porcentajes de aprobación entre 65%-79% para todos los buses de Transmilenio, mayores a los encontrados para camiones y volquetas (<50%). Límites más permisivos como 3.000.000 #/cm<sup>3</sup> resultan en una aprobación global del 90% de este tipo de buses.

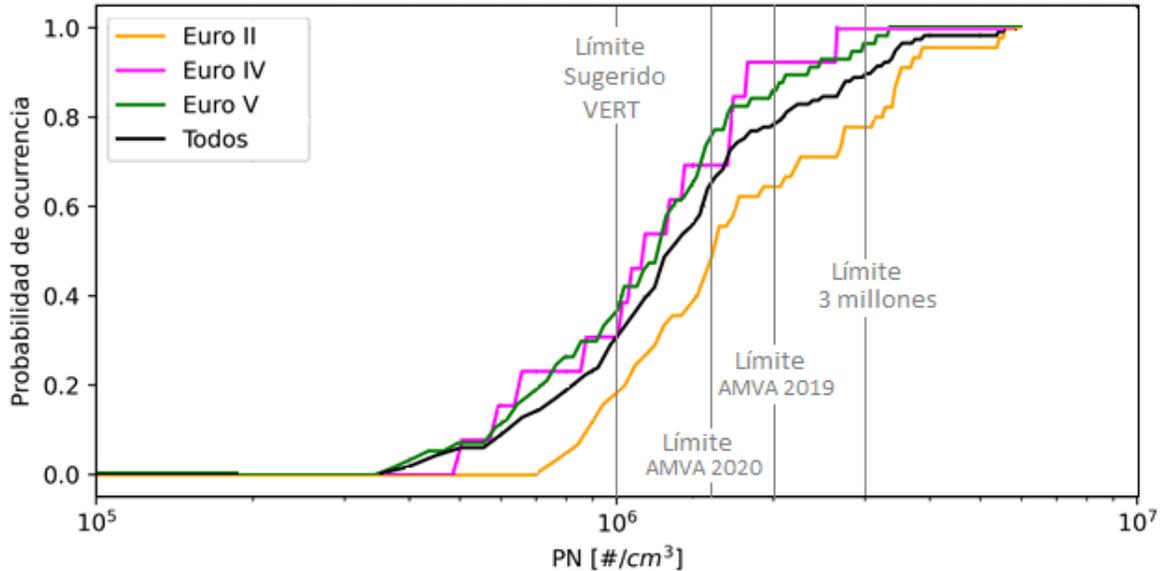


Figura 50. Impacto del límite de aprobación en vehículos diésel sin DPF.

Tabla 12. Porcentaje de aprobación de buses con tecnologías de alta emisión de PN con diferentes límites de emisión

Límite de PN (#/cm <sup>3</sup> )	Euro II (45)	Euro IV (13)	Euro V (57)	Todos (117)
1.000.000 (Sugerido VERT)	18%	30%	37%	30%
1.500.000 (AMVA 2020)	49%	69%	75%	65%
2.000.000 (AMVA 2019)	64%	92%	86%	79%
3.000.000	78%	100%	96%	90%

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

Se midió la emisión de concentración de partículas sólidas (sub 23 nm), en prueba al ralentí bajo, a 1474 buses de Transmilenio en un amplio rango de tecnologías de control de emisión de contaminantes: Euro II, Euro III, Euro IV, Euro V, Euro V + DPF, Euro VI con combustible diésel y GNV. A continuación, se presentan las principales conclusiones de la campaña de mediciones y para cada categoría vehicular.

### *Generales*

- La flota diésel sin DPF medida presentó niveles de partículas en promedio entre 1.200.000 y 1.500.000  $\#/cm^3$  (un 30% presentaron concentraciones de PN superiores a los 2.000.000  $\#/cm^3$ ). Comparado con el 67% de los buses con DPF que tuvieron emisiones de PN menores a 5.000  $\#/cm^3$  se percibe que la renovación de la flota genera una reducción del número de partículas emitidas cercanas al 99,5%.
- Al comparar la emisión de los buses Euro V con y sin DPF se evidencia que la eficiencia de filtración y remoción de partículas en los filtros es superior al 95%.
- Frente a referentes internacionales que sugieren límites de emisión de PN para determinar si un DPF está en buen estado: para el límite establecido por VERT de 50.000  $\#/cm^3$  el 81% de la flota con DPF aprobaría este estándar. Respecto a los límites establecidos en Alemania y Holanda, de 250.000 y 1.000.000  $\#/cm^3$ , los niveles de aprobación de la flota con DPF medida serían 94% y 99%, respectivamente.

### *Logística y procedimiento de la prueba*

- Fue posible realizar la prueba de PN con una frecuencia de 1 bus cada 2 minutos, utilizando el NPET 3795, con un equipo de 2 personas. Esta frecuencia depende de disponibilidad de buses y conductores que permita un flujo constante de vehículos en la zona de medición.
- Es posible realizar las mediciones en un punto fijo con los vehículos circulando, o de forma móvil con los vehículos parqueados.
- Se recomienda, para vehículos con DPF que en la prueba al ralentí bajo emitan entre 25.000 y 250.000  $\#/cm^3$ , realizar una prueba adicional al ralentí alto, para detectar si el DPF requiere mantenimiento.

### *Vehículos GNV*

- En este tipo de vehículos es necesario garantizar que estén a la temperatura de operación o a una temperatura del cárter mayor a 60°C para realizar la medición, con el fin de evitar condensación de vapor de agua en el tubo de escape o en el equipo de medición.

- Se midieron 631 buses Euro VI a GNV. El 98% de estos buses presenta emisión de PN inferior a 5000 #/cm<sup>3</sup>. Sólo 7 buses presentaron emisión de PN superior a 10.000 #/cm<sup>3</sup>, uno de ellos cercano a 30.000 #/cm<sup>3</sup>.
- No se encontró influencia en el año modelo, kilometraje recorrido, cilindrada.
- Se recomienda explorar nuevos límites de emisión de PN para este tipo de buses, incluyendo un rango inferior de partículas (<23 nm), ya que en el rango de medición actual (23 – 1000 nm) no se pueden detectar diferencias o anomalías en la medición de concentración de PN.

### ***Vehículos diésel con DPF***

- Se midieron 660 buses diésel Euro V con DPF adaptado y 66 buses diésel Euro VI con DPF de fábrica. El 68% de estos buses presenta emisión de PN inferior a 5000 #/cm<sup>3</sup> (65% Euro V y 92% Euro VI).
- No es necesario realizar la prueba de emisión de PN con el vehículo a temperatura de operación, ya que el DPF debe eliminar >99% de las partículas de los gases de escape.
- Los buses Euro V + DPF presentan emisiones de PN más altas que los Euro VI del mismo modelo. A medida que aumenta el kilometraje aumenta la cantidad de buses con emisiones mayores a 5000 #/cm<sup>3</sup> y a 250.000 #/cm<sup>3</sup>, indicando la importancia del mantenimiento frecuente y oportuno de los vehículos y el DPF. No se encontró influencia de la cilindrada en la emisión de PN.
- La prueba de emisión de PN es exitosa para la detección de fallo del DPF. 40 buses, 5.5% del total de esta categoría, presentaron emisiones en la prueba al ralentí bajo mayores a 250.000 #/cm<sup>3</sup>.
- Se recomienda explorar un límite inferior a 250.000 en la prueba al ralentí bajo para determinar fallo en el DPF, ya que se encontró que buses con emisión mayor a 70.000 #/cm<sup>3</sup> en ralentí bajo, emitían más de 250.000 #/cm<sup>3</sup> al ralentí alto, indicando requerimiento de mantenimiento del DPF.
- La operación y mantenimiento de los buses en cada patio mostró ser relevante. Se encontró que el 98% de los buses con fallo en el DPF (>250.000 #/cm<sup>3</sup>) y el 95% con alta posibilidad de fallo (entre 70.000 y 250.000 #/cm<sup>3</sup>) pertenecen a un patio de operación.
- Se recomienda adicionar al protocolo una prueba de ralentí alto para buses con emisiones entre 25.000 y 250.000 #/cm<sup>3</sup>, ya que se encontró que algunos de éstos pueden presentar emisión mayor a 250.000 #/cm<sup>3</sup> al ralentí alto.
- Se recomienda la prueba de emisión de PN tanto para ITP como para vehículos nuevos, con la intención de detectar fallos en el DPF, pues se encontró 1 bus Euro VI que aún no ha entrado a circulación con emisión de 811.088 #/cm<sup>3</sup>.

### *Vehículos diésel sin DPF*

- Las pruebas con vehículos diésel sin DPF requieren de un equipo con capacidad de medir altas concentraciones de PN (mayores a 5.000.000 #/cm<sup>3</sup>). El 24% de los buses sin DPF se midieron con ayuda de un dilutor externo puesto que podrían superar el límite del NPET. El uso de dilutor no es factible en pruebas ITP por su alto costo y tamaño de equipos auxiliares.
- Se midieron 117 buses diésel sin DPF: 25 Euro II, 2 Euro III, 13 Euro IV y 57 Euro V. El rango de emisión de PN se encontró entre 345.000 y 5.600.000 #/cm<sup>3</sup>.
- No hay diferencias significativas entre la emisión de PN según la tecnología, el año modelo, kilometraje recorrido, cilindrada o patio de medición. Sólo los buses Euro II modelo 2004 presentan una emisión de PN relativamente más alta.

## 7. Referencias

- [1] Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, “Mejorando el clima y el aire que respiramos. Programa CALAC: Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina.” Perú, 2013.
- [2] CALAC+, “Propuesta de Sistema de fiscalización y control de flota vehicular Euro V y Euro VI para Colombia.”
- [3] IARC, “Diesel engine exhaust carcinogenic,” *J. Natl. Cancer Inst.*, vol. 104, no. 11, pp. 855–868, 2012.
- [4] A. E. Aust *et al.*, “Particle characteristics responsible for effects on human lung epithelial cells,” *Res Rep Heal. Eff Inst*, no. 110, pp. 1–65; discussion 67-76, 2002.
- [5] B. Brunekreef and S. T. Holgate, “Air pollution and health,” *Lancet*, vol. 360, no. 9341, pp. 1233–1242, 2002.
- [6] Dirección Nacional de Planeación, “Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia,” 2018.
- [7] IDEAM, “Calidad del Aire en Colombia 2017,” 2018.
- [8] D. B. Kittelson, “Engines and nanoparticles: a review,” *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, no. 5, pp. 575–588, 1998.
- [9] A. Penn, G. Murphy, S. Barker, W. Henk, and L. Penn, “Combustion-derived ultrafine particles transport organic toxicants to target respiratory cells,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 113, no. 8, pp. 956–963, Aug. 2005.
- [10] ICCT, “Euro VI for Brazil: A clear path for cleaner skies,” 2017. [Online]. Available: <https://theicct.org/blogs/staff/euro-vi-for-brazil-a-clear-path-to-cleaner-skies>.
- [11] AECC, “History of the heavy duty emission standards.” [Online]. Available: <https://www.aecc.eu/legislation/heavy-duty-vehicles/>.
- [12] AMVA and Universidad de Antioquia, *Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá*. AMVA, 2019.
- [13] G. Kadijk, M. Elstgeest, N. Ligterink, and P. J. van der Mark, “Investigation into a Periodic Technical Inspection (PTI) test method to check for presence and proper functioning of Diesel Particulate Filters in light-duty diesel vehicles - part 2,” 2017.
- [14] F. Boveroux *et al.*, “Feasibility study of a new test procedure to identify high emitters of particulate matter during periodic technical inspection,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2019-April, no. April, pp. 2–9, 2019.
- [15] M. Jones, “Do opacimeters have a role in future diesel exhaust gas legislation?,” in *ETH conference on nanoparticle measurement*, 2003.
- [16] G. Kadijk, M. Elstgeest, P. J. Van Der Mark, and N. E. Ligterink, “Follow-up research into the PN limit value and the measurement method for checking particulate filters with a particle number counter,” 2020.
- [17] Vert, “PTI by Particle Count PN at Low Idle,” *Technical Instruction Technique TA-024/21*. pp. 1–12, 2021.
- [18] H. Burtscher, T. Lutz, and A. Mayer, “A New Periodic Technical Inspection for Particle Emissions of Vehicles,” *Emiss. Control Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 279–287, 2019.
- [19] A. Mayer, “Eliminar las Nanopartículas de Motores de Combustión es la única solución para limpiar el aire en las megaciudades en particular en la altura de CDMX,” in *1ª Conferencia Latinoamericana sobre emisión de nanopartículas en motores de combustión interna*, 2019.
- [20] G. Kadijk and J. Spreen, “Roadworthiness Test Investigations of Diesel Particulate Filters,” 2015.

- [21] B. Giechaskiel *et al.*, "Measurement of automotive nonvolatile particle number emissions within the European legislative framework: A review," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 46, no. 7, pp. 719–749, 2012.
- [22] B. GIECHASKIEL *et al.*, "Particle number measurements in the European legislation and future JRC activities," *Combust. Engines*, vol. 174, no. 3, pp. 3–16, 2018.
- [23] T. Lähde and B. Giechaskiel, "Particle Number Emissions of Gasoline , Compressed Natural Gas ( CNG ) and Liquefied Petroleum Gas ( LPG ) Fueled Vehicles at Different Ambient Temperatures," 2021.
- [24] R. Suarez-Bertoa, "Validation of PN-instruments for low idle PTI-measurements," in *VERT Forum*, 2018, no. March.
- [25] B. Giechaskiel, F. Riccobono, and P. Bonnel, *Feasibility study on the extension of the real driving emissions (RDE) procedure to particle number (PN): Chassis dynamometer evaluation of portable emission measurement systems (PEMS) to measure particle number (PN) concentration: Phase II*. 2015.
- [26] B. Giechaskiel, T. Lähde, R. Suarez-Bertoa, V. Valverde, and M. Clairotte, "Comparisons of laboratory and on-road type-approval cycles with idling emissions. Implications for periodical technical inspection (PTI) sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 20, pp. 1–18, 2020.
- [27] AMVA and Universidad de Antioquia, "DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA DE VEHÍCULOS DIÉSEL PARA EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ BASADA EN EL NÚMERO DE PARTÍCULAS," 2020.
- [28] Swiss Agency for Development and Cooperation, "The Santiago de Chile Diesel Particle Filter Program for Buses of Public Urban Transport: Model Case for Cities of Emerging Countries and Success Story of the Swiss-Chilean Cooperation," no. November, pp. 1–21, 2011.
- [29] C. Arenas, "Side Event COP25: Global Dialogue for Sustainable Transport: National Pathways and Transport Actions." Agencia Suiza para el Desarrollo y la cooperación COSUDE, 2019.
- [30] Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, "Infografía. CALAC. Principales Logros y Resultados (2015)." 2015.
- [31] F. Boveroux *et al.*, "Impact of Mileage on Particle Number Emission Factors for EURO5 and EURO6 Diesel Passenger Cars," *Atmos. Environ.*, vol. 244, no. February 2020, pp. 1–8, 2021.
- [32] B. A. Holmén and A. Ayala, "Ultrafine PM emissions from natural gas, oxidation-catalyst diesel, and particle-trap diesel heavy-duty transit buses," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 23, pp. 5041–5050, 2002.
- [33] CALAC+, "GUÍA TÉCNICA PARA LA INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA (ITP) DE VEHÍCULOS PROVISTOS CON FILTROS DE PARTÍCULAS DIÉSEL BASADO EN EL CONTEO DE PARTÍCULAS." pp. 1–23, 2020.
- [34] L. Tartakovsky *et al.*, "Ultrafine particle emissions by in-use diesel buses of various generations at low-load regimes," *Atmos. Environ.*, vol. 107, pp. 273–280, 2015.



Es un Programa de:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE**

Ejecutado por:



[calac@swisscontact.org.pe](mailto:calac@swisscontact.org.pe)  
[www.programacalac.com](http://www.programacalac.com)  
Facebook: @CALACplus  
Twitter: @Calacplus

Calle José Gálvez N° 692 - Piso 7, Miraflores  
Lima 15073, Perú,  
Teléfonos: +51 (0)1 500 5075  
[www.swisscontact.org](http://www.swisscontact.org)