CONAMA 2026

Inventarios de ciclo de vida basados en datos primarios para apoyar la gestión municipal de residuos

Aplicación a la recogida de residuos mediante carga lateral en Leganés, 2017–2023

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Luis Cepa Núñez. Doctorando en Ingeniería Ambiental, Química y de los Materiales, Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid; Auxiliar Técnico de Medio Ambiente, Ayuntamiento de Leganés.

Otros Autores: Javier Pérez Rodríguez. Director de tesis, Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

Índice

1. Resumen 4
2. Introducción y objetivos 5
2.1. Objetivos 5
3. Caso de estudio y alcance 5
3.1. Límites del sistema 6
4. Construcción del inventario de ciclo de vida 7
4.1. Fuentes de información 8
4.2. Selección y revisión de los registros de pesadas 10
4.3. Consumo de combustible y tratamiento de datos ausentes 10
4.4. Infraestructura de contenerización 12
4.5. Infraestructura de vehículos 13
4.6. Transporte de los residuos a las instalaciones de destino 13
4.7. Resultados 14
4.7.1. Inventario de emisiones directas de gases de efecto invernadero 14
4.7.2. Inventario de otros contaminantes atmosféricos 15
4.7.3. Impactos de la infraestructura de contenerización 16
4.7.4. Transporte de residuos a las instalaciones de destino 17
5. Discusión 18
6. Conclusiones 18
7. Bibliografía 20

1. Resumen

La evaluación ambiental de los servicios municipales de pre-recogida y recogida/transporte de residuos requiere información representativa de su funcionamiento real. Los registros de pesadas, consumos de combustible, vehículos e infraestructuras constituyen una fuente de datos primarios, aunque su heterogeneidad y cobertura incompleta dificultan su utilización directa en el análisis de ciclo de vida (ACV).

Este trabajo desarrolla y aplica una metodología documentada para transformar registros operativos municipales en un inventario de ciclo de vida (ICV) trazable y reproducible. El procedimiento se aplica a la recogida en carga lateral de Leganés durante el periodo 2017–2023, a partir de 38.000 descargas correspondientes a 278.230 toneladas de residuos y 43 vehículos de la flota municipal y de empresas concesionarias, con vehículos de combustión interna que emplean diésel o gas natural comprimido (GNC) como fuente energética.

La metodología comprende la identificación y recopilación de fuentes, la validación y depuración de registros, la armonización de unidades y la integración de la información en un inventario maestro. Se documentan las decisiones metodológicas y se diferencian los datos observados de las estimaciones utilizadas para cubrir lagunas de información.

La unidad funcional es una tonelada de residuos recogida y transportada a las instalaciones de destino. El alcance previsto comprende las etapas de pre-recogida (contenerización) y recogida/transporte de los residuos depositados en los elementos de pre-recogida (contenedores) hasta las instalaciones de tratamiento. Esta última etapa de la gestión de los residuos municipales queda fuera del objeto y alcance del presente estudio.

Como resultado, se obtuvo un inventario anual de emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al consumo de combustible, diferenciando el CO_2 fósil y biogénico, el metano y el óxido nitroso. El CO_2 biogénico se atribuyó a los biocarburantes, como el biodiésel, incorporados al gasóleo comercial, de acuerdo con los factores nacionales utilizados. Para el conjunto del periodo 2017–2023 se estimaron 2.864,94 toneladas de CO_2 fósil y 2.904,69 toneladas de CO_2 equivalente por la combustión, sin incluir el CO_2 biogénico. El consumo energético medio fue de 149,22 MJ por tonelada de residuo. En el trayecto de transporte (*haul*) desde el último punto de recogida hasta las instalaciones de destino, se estimó que cada tonelada de residuo recorrió, de media, 8,63 km. Estos valores no representan el impacto ambiental total del servicio.

La evaluación ambiental está en desarrollo y considera las categorías de cambio climático, formación de ozono troposférico y material particulado/efectos respiratorios, mediante el método Environmental Footprint. El trabajo proporciona una base para evaluar alternativas de flota, contenerización y organización del servicio, así como para orientar la planificación municipal con información ambiental trazable.

Palabras clave: análisis de ciclo de vida; inventario de ciclo de vida; datos primarios; recogida de residuos municipales; toma de decisiones.

2. Introducción y objetivos

La pre-recogida y la recogida/transporte de residuos municipales son servicios esenciales para la gestión de los residuos y el funcionamiento de las ciudades. Su prestación requiere vehículos, combustible y una infraestructura de contenerización que generan impactos ambientales a lo largo de todo su ciclo de vida. Conocer estos impactos puede ayudar a las administraciones locales a identificar oportunidades de mejora y a incorporar criterios ambientales en la planificación del servicio.

La evaluación ambiental de estos servicios requiere información representativa de su funcionamiento. En el ámbito municipal, esta información puede encontrarse en registros de pesadas, consumos de combustible, vehículos e infraestructuras, elaborados para cubrir distintas necesidades de gestión. Su integración en un ACV requiere identificar las fuentes disponibles, revisar su calidad y coherencia, relacionar los datos entre sí y documentar las estimaciones utilizadas cuando existen lagunas de información.

2.1. Objetivos

El objetivo de esta comunicación es presentar el procedimiento desarrollado para construir un ICV de la pre-recogida y recogida/transporte municipal de residuos mediante carga lateral en Leganés, a partir de datos operativos del periodo 2017–2023, y mostrar su aplicación en la evaluación ambiental del servicio.

Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y organizar las fuentes de información necesarias para caracterizar el servicio, sus sistemas de contenerización, sus vehículos, consumos e infraestructuras.
- Integrar y revisar los registros operativos en un inventario documentado, diferenciando los datos observados de las estimaciones empleadas para cubrir las lagunas de información.
- Utilizar el inventario como base para evaluar los impactos ambientales del servicio y analizar cómo la información obtenida puede contribuir a su seguimiento y mejora.

3. Caso de estudio y alcance

El caso de estudio se centra en el servicio de pre-recogida y recogida/transporte municipal de residuos mediante vehículos de carga lateral en Leganés, durante el periodo 2017–2023. El análisis se ha construido a partir de información operativa del servicio, incluyendo registros de pesadas, datos de los vehículos, consumos de combustible e información sobre la infraestructura de contenerización. La diversidad de estas fuentes permite estudiar distintas etapas del servicio, aunque su integración requiere revisar su cobertura y coherencia.

La unidad funcional del estudio es **una tonelada de residuos municipales recogida mediante el servicio de carga lateral y transportada a las instalaciones de destino**. Los recursos empleados y los impactos ambientales se relacionan con esta unidad para expresar los resultados por tonelada de residuo recogido y transportado.

La figura 1 muestra la distribución de los contenedores de carga lateral en Leganés en 2023.

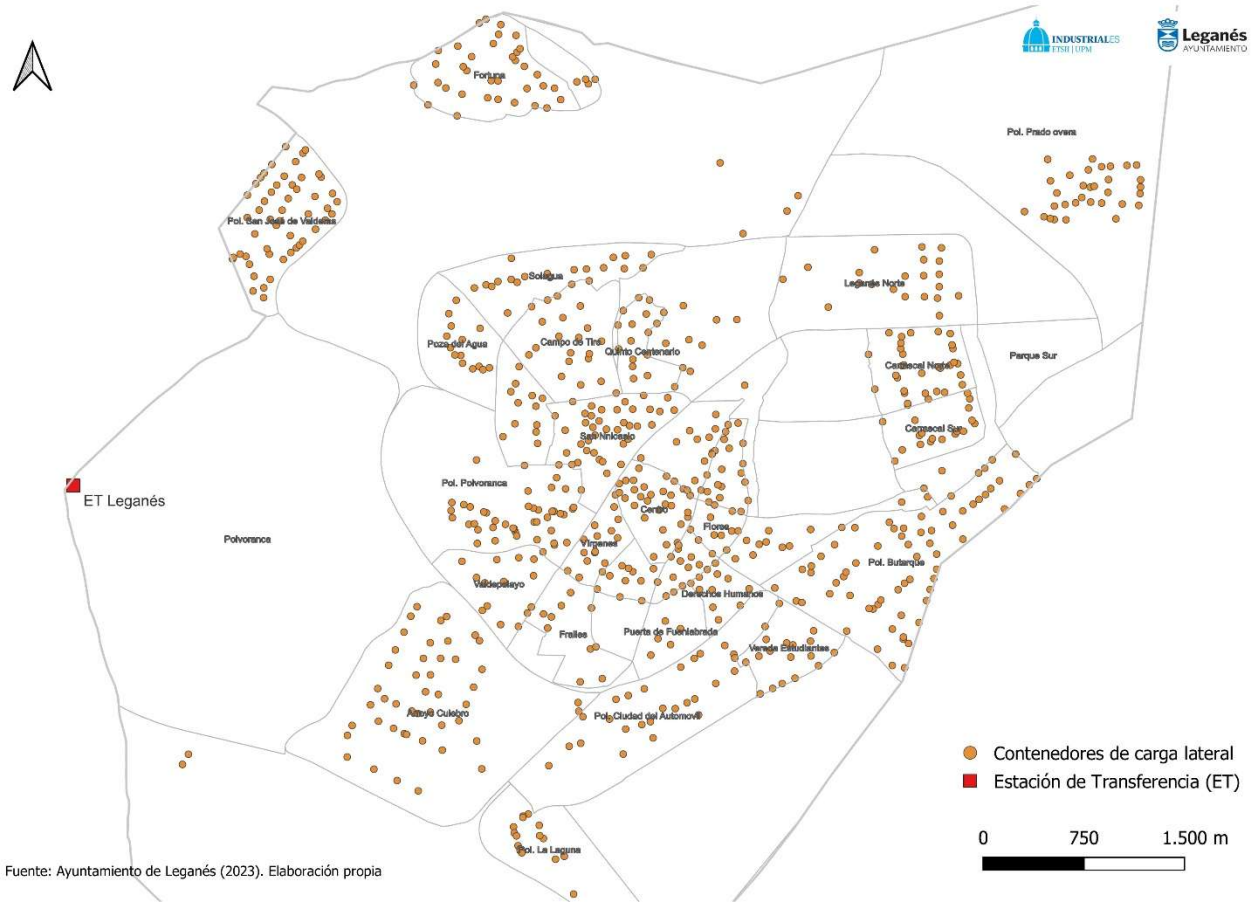


Figura 1. Distribución de los contenedores de carga lateral en Leganés, 2023

3.1. Límites del sistema

El sistema objeto de estudio comprende las etapas de pre-recogida y recogida/transporte de los residuos municipales gestionados mediante carga lateral.

El alcance previsto incluye los procesos asociados al ciclo de vida de los contenedores y vehículos utilizados, el suministro y consumo de combustible, las operaciones de recogida y el transporte de los residuos hasta las instalaciones de destino.

La figura 2 representa el alcance previsto para el estudio: la infraestructura de contenerización, los vehículos, las operaciones de recogida y el transporte hasta las instalaciones de destino. El análisis se centra en la recogida mediante carga lateral, principalmente de las fracciones resto y envases

ligeros, durante 2017–2023. El inventario también incluye descargas registradas como residuos voluminosos u otros residuos municipales, asociadas a la operativa de entrega. El esquema muestra las etapas previstas para la evaluación completa; los resultados parciales presentados no abarcan necesariamente todas ellas. Las emisiones directas asociadas al consumo de combustible que se presentan corresponden a su combustión en los vehículos (*TtW*). Los impactos asociados al suministro del combustible (*WtT*) forman parte del alcance previsto y no se incluyen en esos resultados.

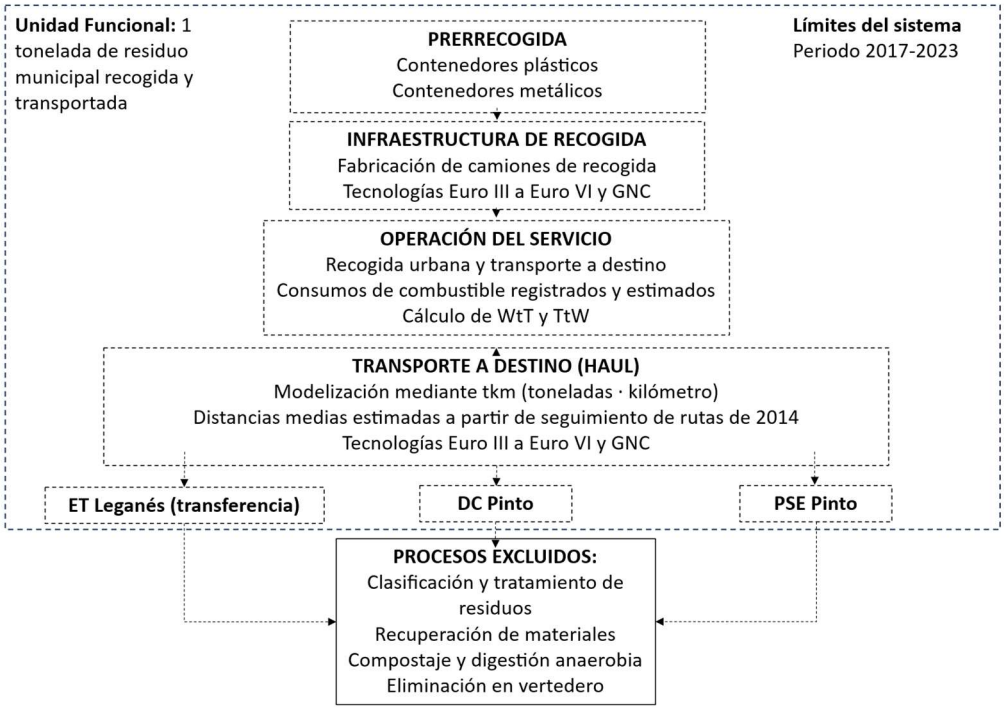


Figura 2. Alcance previsto del estudio de la recogida de residuos mediante carga lateral en Leganés, 2017–2023.

Fuente: elaboración propia

Quedan fuera de los límites del estudio las etapas de tratamiento posteriores a la entrega de los residuos en dichas instalaciones. Los resultados ambientales presentados en esta comunicación se interpretan de acuerdo con los procesos efectivamente incorporados al modelo y las limitaciones indicadas en el apartado correspondiente.

4. Construcción del inventario de ciclo de vida

El ICV se construyó mediante la recopilación, revisión e integración de información operativa del servicio de recogida en carga lateral de Leganés durante el periodo 2017–2023. Para ello, se reunieron registros de pesadas, información sobre los vehículos y sus tecnologías, datos de consumo de combustible y documentación relativa a los contenedores empleados en el servicio.

Las distintas fuentes se organizaron en un inventario maestro que permite relacionar la información disponible y documentar las decisiones adoptadas durante su tratamiento. Cuando no se dispuso de datos para caracterizar una parte de la actividad, se recurrió a estimaciones, diferenciándolas de los datos registrados y dejando constancia de sus hipótesis y limitaciones.

4.1. Fuentes de información

La construcción del inventario se apoyó principalmente en información operativa generada durante la prestación del servicio municipal de recogida. Las fuentes recopiladas incluyeron los registros de pesadas en las instalaciones de destino, los datos de los vehículos utilizados y sus consumos de combustible, la información disponible sobre los contenedores y los seguimientos de rutas empleados para estimar las distancias de transporte.

Estas fuentes se complementaron con información técnica utilizada para caracterizar los procesos del sistema y con datos de referencia para la modelización ambiental. Su combinación permitió relacionar la actividad del servicio con los recursos empleados y las cantidades de residuos transportadas.

La modelización ambiental se realizó en SimaPro 9.1.1.7 (PRé Sustainability B.V., 2020). Para los procesos seleccionados de ecoinvent 3 se utilizó el modelo de asignación *cut-off by classification* en formato de procesos unitarios (Wernet et al., 2016). Para determinados materiales se emplearon también inventarios de PlasticsEurope disponibles en la biblioteca Industry data 2.0 (PlasticsEurope, consulta en 2026).

Los registros de pesadas correspondientes al periodo 2017–2023 se obtuvieron mediante la descarga de los tránsitos disponibles en la plataforma de gestión de residuos domésticos de la Mancomunidad del Sur. Esta información permitió identificar las cantidades de residuos transportadas a las instalaciones de destino y relacionarlas con los vehículos y las características de cada tránsito. Posteriormente, los registros se revisaron y seleccionaron para identificar los correspondientes al servicio de carga lateral objeto de estudio.

Los datos disponibles de consumo de combustible de los vehículos municipales fueron facilitados por la Unidad Administrativa de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Leganés mediante un archivo Excel de registro de consumos, elaborado a partir de las facturas de las estaciones de servicio. Cuando no se dispuso de datos para caracterizar la actividad de determinados vehículos o periodos, se recurrió a estimaciones, identificadas como tales en el inventario maestro.

En relación con los vehículos de las empresas que prestaron apoyo al servicio, se dispuso de datos de consumo correspondientes a un vehículo de una empresa concesionaria durante dos años, facilitados por el responsable de la empresa en formato Excel. Para el resto de los vehículos de las empresas, los consumos se estimaron a partir de la información disponible, de acuerdo con los criterios descritos en el apartado metodológico correspondiente.

La identificación y caracterización de los vehículos se realizó a partir de sus matrículas y de la documentación técnica disponible. Para los camiones municipales se utilizaron sus fichas técnicas. En el caso de las empresas que prestaron apoyo al servicio, se dispuso de las fichas técnicas de

los vehículos principales, adscritos al contrato y utilizados habitualmente. Para los vehículos de sustitución que realizaron un número reducido de servicios, se consultó la información disponible en la página de la Dirección General de Tráfico. La tecnología de cada vehículo se identificó mediante las fichas técnicas o las consultas realizadas a la Dirección General de Tráfico, sin recurrir a estimaciones. La matrícula permitió relacionar esta información con los registros de pesadas.

La información sobre la infraestructura de contenerización se obtuvo mediante inventarios anuales de los contenedores instalados, elaborados a partir de datos recopilados directamente en campo durante el periodo de estudio. Estos inventarios permitieron identificar los tipos de contenedores presentes en el servicio, tanto de plástico como metálicos. Para la modelización en SimaPro se utilizaron las fichas técnicas de ambos modelos, de las que se obtuvo información sobre sus materiales, procesos de fabricación y otras características técnicas.

Para estimar las distancias de transporte desde el último punto de recogida hasta las instalaciones de destino se utilizaron distancias medias obtenidas a partir de estudios previos de seguimientos de rutas. Estas distancias se aplicaron al cálculo de las toneladas-kilómetro correspondientes a los flujos de residuos del periodo de estudio.

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas para la construcción del inventario

Información	**Fuente**	**Utilización en el inventario**
Tránsitos y pesadas	Plataforma de gestión de residuos domésticos de la Mancomunidad del Sur	Identificación de descargas, cantidades transportadas, vehículos e instalaciones de destino.
Consumos de combustible de vehículos municipales	Unidad Administrativa de Medio Ambiente, a partir de facturas de estaciones de servicio	Caracterización del consumo de la flota municipal.
Consumos de vehículos de empresas	Datos facilitados por una empresa concesionaria para un vehículo durante dos años; estimaciones para el resto	Caracterización del consumo de los vehículos de apoyo.
Características y tecnología de los vehículos	Fichas técnicas y consultas a la Dirección General de Tráfico	Identificación de los vehículos y sus tecnologías y relación con los registros de pesadas.
Contenedores instalados	Inventarios anuales elaborados mediante trabajo de campo	Identificación de la infraestructura instalada durante el estudio.
Características de los contenedores	Fichas técnicas de los modelos de plástico y metálico	Modelización de los contenedores en SimaPro.
Contenedores utilizados o adquiridos	Comunicación oral del responsable del servicio para el total de plástico; contrato de suministro para los metálicos	Información utilizada para caracterizar la infraestructura y su renovación.

Información	Fuente	Utilización en el inventario
Distancias al destino	Seguimientos de rutas realizados en 2014	Estimación de las distancias medias para el cálculo de toneladas-kilómetro.
Consumo de GNC sin datos directos en 2023	Datos operativos disponibles de la flota de GNC durante 2024–2026	Estimación retrospectiva del consumo de GNC a partir de las toneladas recogidas.
Factores de emisión	Sistema Español de Inventario de Emisiones, hoja A.II FEI_KG; guía EMEP/EEA para el factor de N_2O del GNC	Estimación de las emisiones directas asociadas al consumo de combustible.
Inventarios de referencia para la modelización	ecoinvent 3, modelo *cut-off* y procesos unitarios; biblioteca Industry data 2.0	Modelización en SimaPro de procesos de materiales, energía y transporte.

Fuente: elaboración propia

4.2. Selección y revisión de los registros de pesadas

Los registros de tránsitos obtenidos de la plataforma de gestión de residuos domésticos de la Mancomunidad del Sur se vincularon con el registro de vehículos de la misma plataforma mediante la matrícula. Esta vinculación permitió identificar el tipo de vehículo y seleccionar los tránsitos correspondientes a recolectores de carga lateral. Para cada tránsito seleccionado se conservaron los datos originales disponibles, entre ellos el año, la matrícula, la fracción de residuo registrada, la instalación de destino y el peso neto.

Tras la selección, se revisaron las masas registradas. Se identificaron 44 tránsitos sin dato de masa, que se excluyeron del inventario utilizado. Los registros con masas reducidas se conservaron. El conjunto utilizado comprende 38.000 registros con pesada.

Para relacionar la actividad con los consumos de combustible, los registros se agruparon por año, vehículo y fracción de residuo. Para cada combinación se obtuvo el número de descargas y la masa total transportada. La matrícula y el año permitieron vincular esta información con las características del vehículo y con su consumo anual, observado o estimado según la disponibilidad de datos.

4.3. Consumo de combustible y tratamiento de datos ausentes

Los consumos de combustible se relacionaron con los registros de actividad mediante la matrícula y el año. Cuando se dispuso de registros de consumo, estos se incorporaron al inventario como datos observados. Los consumos expresados en litros se convirtieron a unidades de masa utilizando la densidad de cada fuente energética empleada.

Para los vehículos diésel sin datos observados el consumo se estimó a partir de las toneladas recogidas. Con carácter general, se utilizó un consumo específico obtenido dividiendo la suma del combustible observado entre la suma de las toneladas correspondientes a esos registros. Cuando se dispuso de información suficiente del mismo vehículo en otros años, se emplearon sus indicadores históricos de consumo. Los valores estimados se identificaron como tales en el inventario.

Para los vehículos de GNC sin registros directos de consumo en 2023, se realizó una estimación retrospectiva mediante un indicador de elaboración propia. Este se obtuvo como media de los consumos específicos anuales de la flota durante el periodo 2024, 2025 y 2026, calculados a partir de los registros municipales de suministro de GNC y de las toneladas recogidas según las pesadas de la Mancomunidad del Sur. El valor adoptado, de 4,11 kg de GNC por tonelada de residuo recogido, se aplicó a las toneladas registradas para cada vehículo en 2023. La estimación supone que las condiciones de funcionamiento del periodo de referencia son representativas de las de 2023.

El consumo anual de cada vehículo se distribuyó entre las fracciones recogidas en proporción a la masa registrada para cada una de ellas. Este reparto supone aplicar un mismo consumo específico a las distintas fracciones transportadas por un vehículo en un año y constituye una aproximación, ya que no se dispone de consumos medidos por fracción.

Las emisiones directas de GEI y otros contaminantes atmosféricos se estimaron multiplicando la masa de combustible consumida por los factores de emisión correspondientes, con las conversiones de unidades necesarias. Para el CO_2 se distinguieron las contribuciones de origen fósil y biogénico de acuerdo con los parámetros y la composición del combustible adoptados en el inventario.

Para estimar las emisiones directas se utilizó como referencia metodológica el *Documento de Inventario Nacional de gases de efecto invernadero*, edición 2026 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], 2026). Para los vehículos diésel se aplicaron los factores nacionales anuales correspondientes a vehículos pesados de más de 3,5 toneladas, disponibles en la hoja A.II FEI_KG del anexo de la ficha «Transporte por carretera: combustión», accesible desde la página de metodologías del MITECO, consultada el 13 de noviembre de 2026. Para el CO_2 y el CH_4 de los vehículos de GNC se emplearon, como aproximación, los factores nacionales correspondientes a autobuses propulsados por ese combustible. Para el N_2O del GNC se aplicó el factor medio de 0,27 g de N_2O por kilogramo de combustible, correspondiente a autobuses de GNC en la guía EMEP/EEA (Ntziachristos & Samaras, 2026, tabla 3-7). El uso de factores de autobuses para representar a los vehículos de recogida constituye una limitación de la estimación.

La aplicación de los indicadores a vehículos y periodos sin datos observados introduce incertidumbre, especialmente cuando las condiciones de operación difieren de las representadas en los datos utilizados para la estimación. Esta limitación se tiene en cuenta en la interpretación de los resultados ambientales.

4.4. Infraestructura de contenerización

La infraestructura de contenerización considerada en el estudio corresponde a los contenedores de carga lateral utilizados para la recogida de las fracciones resto y envases. Para caracterizarla se emplearon los inventarios anuales de contenedores instalados, elaborados a partir de revisiones de campo realizadas durante el periodo de estudio.

La fabricación de los contenedores se modelizó en SimaPro a partir de la información disponible en las fichas técnicas y de hipótesis para completar datos no disponibles. Las masas de algunos componentes, la superficie galvanizada y la representatividad de determinados procesos requieren contraste adicional con información específica de los fabricantes.

Durante el periodo estudiado se renovó la infraestructura: la sustitución de los contenedores de plástico por metálicos comenzó en diciembre de 2022 y finalizó en enero de 2023. Como aproximación para el cálculo anual, se asignaron los contenedores de plástico hasta 2022 y los metálicos a 2023.

Para los contenedores de plástico se consideró un total de 1.750 unidades utilizadas entre 2014 y 2022, incluidas las instaladas inicialmente y las reposiciones. En un cálculo preliminar, el impacto estimado de fabricación de estas unidades se distribuyó uniformemente entre los nueve años del periodo, obteniendo un impacto anual medio que se asignó a cada uno de los años comprendidos entre 2017 y 2022.

Este reparto constituye una aproximación, ya que no se conoce la distribución anual de las reposiciones. Además, la cifra total de unidades procede de una comunicación verbal del responsable del servicio y no se ha localizado documentación que permita contrastarla. La composición del contenedor y los procesos de fabricación utilizados en la modelización requieren una revisión adicional antes de emplear este cálculo como contribución anual definitiva de la contenerización.

Para los contenedores metálicos se consideraron las 1.583 unidades de carga lateral de 3.200 litros adquiridas para las fracciones resto y envases, según el contrato de suministro. El impacto de fabricación del conjunto se distribuyó uniformemente entre una vida útil estimada de 15 años, de acuerdo con la información del fabricante, para obtener una contribución anual de la infraestructura. Este reparto constituye una aproximación: al no conocer la evolución futura del parque, no puede asegurarse que las unidades adquiridas sean suficientes durante todo el periodo ni cuantificarse las reposiciones adicionales que pudieran ser necesarias.

La contribución anual estimada de la infraestructura de contenerización se relaciona con la cantidad total de residuos recogidos durante cada año por el conjunto de los vehículos que prestan el servicio, tanto municipales como de las empresas concesionarias. De esta forma se obtiene su contribución por tonelada de residuo recogido.

4.5. Infraestructura de vehículos

La infraestructura de vehículos se caracterizó a partir de la información disponible sobre los camiones utilizados en la recogida mediante carga lateral. La matrícula permitió relacionar cada vehículo con los registros de pesadas y distribuir su actividad por año y fracción de residuo.

Como primera aproximación, se modelizó en SimaPro el impacto asociado a un vehículo de referencia de la base de datos ecoinvent, utilizado como aproximación para los camiones diésel de la flota municipal. Para los camiones diésel de la flota municipal, este impacto se distribuyó entre las toneladas registradas para cada vehículo durante el historial de pesadas disponible hasta el 3 de noviembre de 2026. El factor obtenido se aplicó a las toneladas recogidas por el vehículo en cada año y fracción.

Este reparto es provisional. Para los vehículos que continúan en servicio, las toneladas registradas hasta la fecha de corte no representan la actividad completa de su vida útil. En consecuencia, el impacto asignado a los años estudiados puede ser superior al que resultaría si se considerase también su actividad futura.

Además, la revisión del proceso de transporte utilizado en SimaPro mostró que este incluye una contribución de infraestructura de vehículo. Por ello, la integración del reparto de fabricación con los resultados de transporte requiere identificar y resolver el posible solapamiento entre ambos modelos. La representatividad del vehículo de referencia y la incorporación de los vehículos de las empresas concesionarias también están pendientes de revisión.

4.6. Transporte de los residuos a las instalaciones de destino

El transporte se caracterizó a partir de los registros de pesadas y de las distancias medias estimadas entre el último punto de recogida y las instalaciones de destino. Para cada combinación de año, vehículo, fracción de residuo y destino, se determinó el número de tránsitos y la masa media transportada por tránsito.

Las toneladas-kilómetro se calcularon multiplicando el número de tránsitos por la masa media transportada, expresada en toneladas, y por la distancia media al destino, expresada en kilómetros. Los resultados se relacionaron con la tecnología de los vehículos y se utilizaron para modelizar el transporte en SimaPro mediante procesos de referencia de ecoinvent.

Las distancias medias proceden de seguimientos de rutas realizados en 2014 y se aplicaron al periodo de estudio 2017–2023. Esta aproximación introduce incertidumbre, ya que las rutas y los puntos finales de recogida pueden haber variado entre años.

El cálculo representa el trayecto estimado desde el último punto de recogida hasta la instalación de destino. Los consumos anuales de combustible utilizados para caracterizar la operación incluyen también este desplazamiento. Por ello, antes de integrar los resultados, se revisará el posible

solapamiento con los procesos de transporte de ecoinvent, que incluyen consumo de combustible y emisiones asociadas al transporte.

4.7. Resultados

Durante el periodo 2017–2023, el inventario incluyó 278.230,06 toneladas de residuos recogidos y transportados mediante el servicio de carga lateral. De esta cantidad, 277.804,00 toneladas fueron recogidas y transportadas por vehículos diésel y 426,06 toneladas por vehículos de GNC; estas últimas corresponden a 2023.

En el caso de los vehículos diésel, 235.337,22 toneladas, equivalentes al 84,71 % de la masa transportada por estos vehículos, se asociaron a combinaciones de vehículo y año para las que se disponía de datos de consumo registrado. Para las 42.466,78 toneladas restantes, correspondientes al 15,29 %, se utilizaron consumos estimados. El consumo de los vehículos de GNC se estimó retrospectivamente mediante el procedimiento descrito en el apartado 4.3.

Durante el periodo 2017–2023, la energía asociada al combustible consumido por los vehículos del servicio se estimó en 41.517,14 GJ, calculados a partir de los consumos de diésel y GNC y sus respectivos poderes caloríficos inferiores. En relación con las 278.230,06 toneladas de residuos recogidas y transportadas, el consumo energético medio del periodo fue de 149,22 MJ por tonelada.

El indicador anual pasó de 138,72 MJ/t en 2017 a 164,96 MJ/t en 2023, lo que representa un incremento del 18,92 % entre ambos años. Estos resultados incluyen consumos registrados y estimados y no permiten atribuir la variación observada a una única causa.

4.7.1. Inventario de emisiones directas de gases de efecto invernadero

La integración de los consumos de combustible y de los factores de emisión permitió elaborar un inventario anual de emisiones directas de gases de efecto invernadero asociadas a los vehículos de recogida mediante carga lateral durante el periodo 2017–2023. Los resultados incluyen consumos registrados y estimados según la disponibilidad de datos.

El CO_2 biogénico del inventario se atribuyó a los biocarburantes incorporados al gasóleo comercial, de acuerdo con la composición considerada en los factores de emisión utilizados. Por tanto, esta cantidad constituye una estimación y no una medición específica del combustible consumido por la flota.

Para expresar las emisiones en CO_2 equivalente se aplicaron los potenciales de calentamiento global a 100 años del IPCC, teniendo en cuenta su fe de erratas de 2025: 1 para el CO_2 fósil, 25,3 para el CH_4 y 267 para el N_2O. Al metano de combustión se le aplicó el factor denominado «no fósil», utilizando el criterio de contabilización para la combustión del GHG Protocol con los valores corregidos posteriormente por el IPCC (GHG Protocol, 2024; IPCC, 2025).

Tabla 2. Emisiones directas de *GEI* asociadas al consumo de combustible de los vehículos de recogida en carga lateral, 2017 – 2023

Año	CO_2 total (t)	CO_2 fósil (t)	CO_2 biogénico (t)	CH_4 (kg)	N_2O (kg)	GEI de combustión (t CO_2 eq)
2017	413,944	392,926	21,018	12,57	16,27	397,588
2018	411,642	384,663	26,979	11,62	16,95	389,483
2019	403,095	376,920	26,175	10,23	17,67	381,896
2020	442,754	410,023	32,730	9,95	20,60	415,775
2021	458,360	428,127	30,234	9,58	22,22	434,303
2022	473,684	447,195	26,489	8,84	24,01	453,829
2023	462,430	425,086	37,343	12,44	24,01	431,811
Total	**3.065,909**	**2.864,941**	**200,969**	**75,24**	**141,73**	**2.904,685**

Fuente: elaboración propia a partir de los consumos de combustible y los factores de emisión utilizados en el inventario. El CO_2 total incluye las fracciones fósil y biogénica. Los cálculos se realizaron con los valores sin redondear.

La columna de GEI de combustión incluye el CO_2 fósil, el CH_4 y el N_2O expresados en CO_2 equivalente. El CO_2 biogénico se presenta por separado y no se incluye en ese resultado.

4.7.2. Inventario de otros contaminantes atmosféricos

Además de la emisión de GEI, se inventariaron contaminantes atmosféricos asociados al consumo de combustible de los vehículos. La tabla 3 presenta las emisiones anuales estimadas de óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) y material particulado con diámetro aerodinámico equivalente inferior a 2,5 micrómetros (PM2,5). Estas sustancias se consideran en la posterior evaluación de categorías relacionadas con la formación de ozono troposférico y material particulado/efectos respiratorios.

Tabla 3. Emisiones directas inventariadas de NO_x, COVNM y PM2,5 asociadas al consumo de combustible de los vehículos de recogida en carga lateral, 2017–2023.

Año	NO_x (kg)	COVNM (kg)	PM2,5 (kg)
2017	2.082,43	51,81	34,82
2018	1.896,32	48,30	31,90
2019	1.636,67	42,67	27,45
2020	1.571,72	40,66	26,07
2021	1.438,95	38,37	24,18
2022	1.290,32	34,83	21,46
2023	1.164,78	32,11	19,19
Total	**11.081,20**	**288,75**	**185,09**

Fuente: elaboración propia a partir del libro maestro de parámetros e ICV. Los valores representan masas de sustancias inventariadas; no son resultados caracterizados de impacto ambiental. Los totales se calcularon con los valores sin redondear, por lo que pueden diferir ligeramente de la suma de los valores anuales mostrados.

Para el conjunto del periodo 2017–2023 se estimaron emisiones directas de 11.081,20 kg de NO_x, 288,75 kg de COVNM y 185,09 kg de PM2,5. Las cantidades anuales estimadas de estos tres contaminantes disminuyeron entre 2017 y 2023. Esta evolución debe interpretarse considerando los cambios en la flota, la actividad del servicio y el uso de consumos estimados.

Los resultados presentados corresponden a las emisiones directas estimadas a partir del consumo de combustible de los vehículos. Para cubrir la falta de datos se utilizaron consumos estimados, por lo que su interpretación debe considerar la incertidumbre asociada a estas estimaciones. La evaluación ambiental del servicio deberá completarse con los procesos previstos dentro de los límites del sistema, evitando solapamientos entre los consumos de combustible y la modelización del transporte a destino.

4.7.3. Impactos de la infraestructura de contenerización

Se construyeron modelos de contenedores de carga lateral de 3.200 litros para estudiar la infraestructura del servicio. Durante la revisión de sus inventarios se identificaron aspectos de composición y fabricación que deben contrastarse antes de obtener resultados anuales comparables por tonelada de residuo. Como ejemplo del procedimiento, se presenta un escenario exploratorio para un contenedor metálico.

El escenario incluye los procesos seleccionados de producción de acero, pintura, poliamida, electricidad, galvanizado y transformación del acero. La tabla 4 muestra los resultados caracterizados para una unidad. Las cifras reflejan únicamente los procesos y supuestos incluidos en el modelo y no representan el impacto total del servicio ni el ciclo de vida completo del contenedor.

Tabla 4. Resultados exploratorios de la modelización de un contenedor metálico de 3.200 litros.

Unidad	Cambio climático kg CO_2 eq	Formación de ozono kg COVNM eq	Efectos respiratorios incidencia
1 contenedor	666,02	2,1008	$3{,}708 \times 10^{-5}$

Fuente: elaboración propia con SimaPro 9.1.1.7. Método: EF Method (adapted) V1.01 / Global (2010) / with tox categories. Resultados provisionales para una unidad.

En el escenario modelizado se obtuvieron 666,02 kg de CO_2 equivalente por contenedor en la categoría de cambio climático. La cadena asociada al proceso de transformación del acero contribuyó con 437,02 kg de CO_2 equivalente, el 65,6 % de este resultado. Esta contribución incluye los procesos de suministro asociados y depende de las hipótesis adoptadas.

Para el acero se consideraron 265 kg estimados por unidad y se utilizó un proceso medio europeo para aproximar su transformación. Ese proceso incluye acero adicional asociado a pérdidas de fabricación. Para el galvanizado se estimó una superficie de referencia de 15,9 m², aplicando a 0,265 toneladas la relación de 60 m² por tonelada indicada en la documentación del proceso. La masa y la superficie no son mediciones específicas facilitadas por el fabricante.

La representatividad de la transformación media y de las pérdidas para el proceso real, así como las cantidades de los componentes y la superficie galvanizada, requieren comprobación adicional. También debe revisarse el inventario del contenedor de plástico antes de comparar ambos modelos o estimar la contribución anual de la contenerización al servicio. El indicador de efectos respiratorios es un resultado potencial modelizado y no representa casos de enfermedad observados.

4.7.4. Transporte de residuos a las instalaciones de destino

La tabla 5 presenta las toneladas-kilómetro estimadas para el transporte de los residuos hasta las instalaciones de destino durante el periodo 2017–2023.

Tabla 5. Transporte estimado de residuos a las instalaciones de destino, 2017–2023.

Año	Transporte estimado (t·km)
2017	339.232,86
2018	341.156,27
2019	344.761,62
2020	343.458,77
2021	351.929,29
2022	345.950,88
2023	334.974,15
Total	**2.401.463,84**

Fuente: elaboración propia a partir de los registros de pesadas y las distancias medias estimadas.

Durante el periodo 2017–2023 se estimó un transporte acumulado de 2.401.463,84 t·km en los desplazamientos desde el último punto de recogida hasta las instalaciones de destino. El valor anual más elevado se obtuvo en 2021, con 351.929,29 t·km, mientras que el menor correspondió a 2023, con 334.974,15 t·km. Estos resultados representan la actividad de transporte estimada a partir de las masas de residuos y las distancias medias consideradas.

Para el conjunto del periodo 2017–2023 se estimó una actividad de transporte de 8,63 t·km por tonelada de residuo recogido y transportado. Es decir, cada tonelada de residuo recorrió, de media, 8,63 km desde el último punto de recogida hasta la instalación de destino. La media se calculó teniendo en cuenta las cantidades de residuos transportadas y las distancias consideradas. El

indicador solo representa ese tramo con carga; no incluye el recorrido anterior de recogida ni los desplazamientos en vacío.

5. Discusión

La integración de los registros de pesadas, los datos de los vehículos y los consumos de combustible ha permitido construir un inventario de la recogida mediante carga lateral desagregado por vehículo, año y fracción de residuo. La combinación de consumos registrados y estimados amplía la cobertura del inventario, aunque introduce incertidumbre cuando los indicadores utilizados para completar los datos ausentes no representan plenamente las condiciones de operación de cada vehículo.

La evolución de las emisiones directas estimadas debe interpretarse teniendo en cuenta tanto los consumos de combustible como los factores de emisión aplicados a cada año. En el caso de los vehículos diésel, se emplearon factores nacionales para vehículos pesados que no están diferenciados por la norma Euro de cada camión. Por ello, los resultados no permiten aislar, por sí solos, el efecto de la renovación tecnológica de la flota sobre las emisiones.

Por otra parte, las toneladas-kilómetro del transporte a destino se estimaron utilizando distancias medias procedentes de seguimientos de rutas realizados. Su aplicación al conjunto del periodo de estudio constituye una aproximación, ya que las rutas y los últimos puntos de recogida pudieron variar. Esta limitación debe considerarse al interpretar los resultados ambientales asociados al transporte.

Los resultados de la contenerización dependen de los modelos, las cantidades de unidades y los periodos de reparto considerados. El escenario metálico presentado utiliza masas y superficie estimadas y una transformación media de acero. La composición y los procesos del modelo de plástico también requieren contraste. Por ello, estos resultados no permiten atribuir diferencias ambientales al cambio de material ni establecer una comparación definitiva entre contenedores.

Para completar la evaluación ambiental del servicio será necesario revisar la integración de los procesos de transporte con el inventario de combustible. Los consumos anuales utilizados incluyen el desplazamiento hasta las instalaciones de destino, mientras que los procesos de transporte modelizados incorporan consumos y emisiones. La comparación de sus límites permitirá identificar posibles solapamientos. También se revisará la contribución de la infraestructura de vehículos incluida en el proceso de transporte y su relación con el cálculo realizado por separado.

6. Conclusiones

La integración de los registros de pesadas, los datos de los vehículos y los consumos de combustible ha permitido construir un inventario de ciclo de vida de la recogida mediante carga lateral en Leganés para el periodo 2017–2023. El inventario comprende 38.000 registros con pesada y 278.230,06 toneladas de residuos, organizados por vehículo, año y fracción.

La energía asociada al combustible consumido se estimó en 41.517,14 GJ para el conjunto del periodo, equivalentes a 149,22 MJ por tonelada de residuo recogido y transportado. En el inventario de emisiones directas se estimaron 2.864,941 t de CO_2 de origen fósil y 200,969 t de CO_2 biogénico. Las emisiones de GEI de combustión ascendieron a 2.904,69 t de CO_2 equivalente, sin incluir el CO_2 biogénico.

Para el transporte desde el último punto de recogida hasta las instalaciones de destino se estimó que cada tonelada de residuo recorrió, de media, 8,63 km. Esta distancia media se calculó teniendo en cuenta las cantidades de residuos transportadas y las distancias estimadas para cada flujo. El indicador solo representa ese tramo con carga; no incluye el recorrido previo de recogida ni los desplazamientos en vacío.

El inventario proporciona una base para evaluar ambientalmente el servicio a partir de información operativa municipal. La interpretación de los resultados debe considerar los consumos estimados y las hipótesis adoptadas para las distancias y las infraestructuras. La evaluación integrada requiere completar la revisión de los modelos y de los posibles solapamientos entre combustible, transporte e infraestructura de vehículos.

7. Bibliografía

[1] Greenhouse Gas Protocol. (2024). *IPCC global warming potential values* (versión 2.0). https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2025). *Climate change 2021: The physical science basis. Errata* (versión del 7 de octubre de 2025). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Errata.pdf

[3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Anexos II y IV a la ficha «Transporte por carretera: combustión»* [archivo de Excel; hoja A.II FEI_KG]. Página de acceso consultada el 13 de noviembre de 2026: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/metodologias-estimacion-emisiones.html

[4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2026). *Documento de inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero de España: Serie 1990–2024. Edición 2026.* https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/inventario-gases-efecto-invernadero/es-nid-edicion-2026.pdf

[5] Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2026). 1.A.3.b.i–iv: Road transport. En *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023* (actualización de 2026). European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i

[6] PlasticsEurope. (s. f.). *Eco-profiles set* [Inventarios de ciclo de vida y declaraciones ambientales de producto]. Recuperado el 13 de noviembre de 2026, de https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/

[7] PRé Sustainability B.V. (2020). *SimaPro* (versión 9.1.1.7) [Programa informático]. https://simapro.com/software/desktop/

[8] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 21*(9), 1218–1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

CONAMA 2026