



# Universidad Europea

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño

Máster Universitario en Caminos, Canales y Puertos

Curso Académico 2024-2025

Estudio de la Huella de Carbono en la EDAR  
del Lote 9 Altiplano (Murcia) con Enfoque en  
Alcance 3 (Categorías 5, 7 y Mantenimiento)

Adrián Barros Calleja

Dirigido por:

Gonzalo Fernández Sánchez

## **Agradecimientos**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Gonzalo Fernández Sánchez, por su constante apoyo, dedicación y valiosas orientaciones a lo largo de todo el proceso. Su experiencia, disponibilidad y compromiso han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco a la empresa Sacyr (representado por María Encarnación Mateos Tejedor y a todo su equipo) por brindarme la oportunidad de colaborar con ellos, por facilitarme el acceso a los recursos necesarios y por confiar en mí durante el desarrollo del proyecto. La experiencia práctica adquirida ha sido de un valor incalculable tanto en el plano académico como profesional.

A todos los que, de una forma u otra, me han acompañado en este camino, gracias.

## **Dedicatoria**

A mi familia, por su apoyo incondicional en especial a mi madre Pilar y mi padre José Luis, por ser el pilar constante que me ha sostenido en cada etapa de este camino, su paciencia y su fe en mí incluso en los momentos más difíciles.

A mis amigos, por estar presentes con palabras de ánimo y gestos que siempre supieron llegar a tiempo.

A mis profesores y tutores, por su guía, su exigencia y su confianza en mi trabajo.

Y con especial cariño, a mi abuelo Manolo y mi tía Gloria, cuya ausencia sigue doliendo, pero su memoria y ejemplo me han acompañado cada día en este proceso. Este logro también les pertenece.

## Resumen

El informe presenta el cálculo, análisis y discusión de la huella de carbono de Alcance 3 para las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) de Yecla y Jumilla, gestionadas bajo el contrato ESAMUR Lote 9. Se abordan específicamente las emisiones indirectas asociadas a tres categorías: adquisición de bienes y servicios (mantenimiento subcontratado), gestión de residuos generados en operación y desplazamientos de personal subcontratista. La metodología utilizada sigue los principios del GHG Protocol, empleando factores de emisión DEFRA y datos operativos facilitados por la empresa, priorizando el enfoque físico y económico según la naturaleza de cada proceso; los resultados se presentan en tablas y gráficos que desglosan las emisiones por categoría, estación y tipo de actividad, además de calcular la intensidad de emisión por volumen tratado, empleado y kilómetro recorrido. Se identifican los principales focos emisores, destacando que la mayor parte de la huella corresponde al transporte y gestión de residuos no peligrosos. El informe también discute la representatividad de los datos y la calidad de la información disponible, señalando limitaciones metodológicas como la falta de desglose físico detallado en algunos servicios, la utilización de factores medios genéricos y la dependencia de proxies económicos; en la sección de discusión, se contrastan los resultados obtenidos con estudios internacionales y nacionales del sector, analizando la proporcionalidad de las emisiones del Alcance 3 respecto al total organizacional y destacando tendencias comunes. Se identifican oportunidades de mejora en la gestión ambiental, como la integración futura de los Alcances 1 y 2, la digitalización de registros y la priorización de datos medidos, estableciendo recomendaciones para reducir la huella de carbono y mejorar la trazabilidad en próximos inventarios.

## **Abstract**

The report presents the calculation, analysis and discussion of the Scope 3 carbon footprint for the wastewater treatment plants (WWTP) of Yecla and Jumilla, managed under the ESAMUR Lot 9 contract. Indirect emissions associated with three categories are specifically addressed: procurement of goods and services (subcontracted maintenance), management of waste generated in operation and subcontractor staff travel. The methodology used follows the principles of the GHG Protocol, using DEFRA emission factors and operational data provided by the company, prioritising the physical and economic approach according to the nature of each process; the results are presented in tables and graphs that break down emission intensity by volumen treated, employee and kilometre travelled. The main sources of emissions are identified, highlighting that most of the footprint corresponds to the transport and management of non-hazardous waste. The report also discusses the representativeness of the data and the quality of the information available, pointing out methodological limitations such as the lack of detailed physical breakdown in some services, the use of generic average factors and the reliance on economic proxies; in the discussion section, the results obtained are contrasted with international and national studies of the sector, analysing the proportionality of Scope 3 emissions to the organisational total and highlighting common trends. Opportunities for improvement in environmental management are identified, such as the future integration of Scope 1 and 2, the digitalisation of records and the prioritisation of measured data, establishing recommendations for reducing the carbón footprint and improving traceability in the future inventories.

## Índice de contenidos

|   |    |
|---|----|
| Agradecimiento.....   | 2  |
| Dedicatoria .....   | 3  |
| Resumen.....  | 4  |
| Índice de contenidos.....   | 6  |
| Índice de tablas.....   | 10 |
| Índice de figuras.....  | 14 |
| Introducción .....  | 17 |
| 1.1.    Antecedentes y motivación .....                             | 17 |
| 1.2.    Justificación del proyecto .....                            | 25 |
| 1.3.    Objeto y alcance del TFM .....                              | 27 |
| Objetivos del TFM.....  | 30 |
| 2.1.    Objetivo general.....                                       | 30 |
| 2.2.    Objetivos específicos.....                                  | 30 |
| Estado del Arte .....   | 31 |
| 3.1.    Introducción general al concepto de Huella de Carbono ..... | 31 |
| 3.1.1    Cambio climático y gases de efecto invernadero (GEI) ..... | 33 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.1.2 | Impacto ambiental de infraestructuras y servicios públicos. ....                  | 45  |
| 3.2.  | Conceptualización y definiciones .....  | 48  |
| 3.2.1 | Definición de huella de carbono .....   | 48  |
| 3.2.2 | Diferenciación entre huella organizacional y de producto (LCA). ....              | 60  |
| 3.2.3 | Importancia de la medición en sectores como el agua y el transporte .....         | 63  |
| 3.3.  | Marco normativo y metodologías de referencia.....                                 | 66  |
| 3.3.1 | Normativa y estándares internacionales.....                                       | 66  |
| 3.3.2 | Legislación y guías nacionales (caso español) .....                               | 83  |
| 3.4.  | Aplicación de la Huella de Carbono al tratamiento de aguas residuales.....        | 96  |
| 3.4.1 | Principales emisiones en EDAR (Alcances 1, 2 y 3) .....                           | 103 |
| 3.4.2 | Estado del arte y benchmark comparativo en EDAR.....                              | 111 |
| 3.4.3 | Revisión de estudios y artículos científicos en EDAR .....                        | 113 |
| 3.4.4 | Alcance 3 en plantas de tratamiento de aguas.....                                 | 119 |
| 3.5.  | Foco en Categorías de Alcance 3 (Residuos, Desplazamientos y Mantenimiento) ..... | 123 |
| 3.5.1 | Categoría 5: Residuos .....   | 124 |
| 3.5.2 | Categoría 7: Desplazamiento de empleados .....                                    | 130 |
| 3.5.3 | Mantenimiento en Categoría 1 (Bienes y servicios adquiridos) .....                | 135 |
| 3.6.  | Principales retos y brechas identificadas.....                                    | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| Metodología .....  | 144 |
| 4.1.    Límites organizacionales y operacionales.....      | 144 |
| 4.2.    Método de recogida y análisis de datos .....       | 146 |
| 4.3.    Herramienta de cálculo (Excel) .....               | 149 |
| Desarrollo y análisis .....                                | 160 |
| 5.1.    Descripción de la EDAR y del contrato ESAMUR.....  | 160 |
| 5.1.1 Localización geográfica y contexto hidrológico ..... | 161 |
| 5.1.2 Capacidades técnicas de cada EDAR .....              | 167 |
| 5.1.3 Tecnologías implementadas .....                      | 173 |
| 5.1.4 Generación y tratamiento de subproductos.....        | 192 |
| 5.1.5 Gestión de residuos y trazabilidad .....             | 197 |
| 5.2.    Cálculo de la Huella de Carbono (Alcance 3) .....  | 210 |
| 5.3.    Integración de resultados y validaciones.....      | 218 |
| Resultados .....   | 225 |
| 6.1.    Presentación de resultados.....                    | 226 |
| 6.2.    Análisis de incertidumbre .....                    | 238 |
| 6.3.    Comparación con otros estudios.....                | 245 |
| 6.4.    Oportunidades de mejora .....                      | 247 |



|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| 6.5.              | Calidad y disponibilidad de los datos .....                                     | 249 |
| 6.6.              | Implicaciones para la interpretación .....                                      | 255 |
| Discusión .....   |   | 262 |
| 7.1.              | Estado del arte .....   | 262 |
| 7.2.              | Análisis crítico de la dispersión de resultados .....                           | 263 |
| 7.3.              | Reflexión sobre la validez, robustez y aplicabilidad sectorial .....            | 264 |
| 7.4.              | Comparación numérica y análisis gráfico .....                                   | 265 |
| 7.5.              | Implicaciones prácticas y recomendaciones de gestión .....                      | 266 |
| 7.6.              | Reflexión estratégica, líneas futuras y conclusión de la discusión .....        | 267 |
| 7.7.              | Integración tecnológica, gobernanza ambiental e innovación organizacional ..... | 267 |
| Conclusiones..... |   | 269 |
| 8.1.              | Conclusiones principales .....  | 269 |
| 8.2.              | Recomendaciones para la EDAR.....   | 271 |
| 8.3.              | Líneas futuras.....   | 272 |
| Bibliografía..... |   | 275 |
| Anexos.....       |   | 278 |

## Índice de tablas

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1. Comparación de emisiones de GEI en infraestructuras clave (2021) .....                                    | 48  |
| Tabla 2. Comparación de Emisiones por Alcance en EDAR y Transporte (2021) .....                                    | 65  |
| Tabla 3. Aplicación de marcos normativos al estudio de huella de carbono en EDAR.....                              | 81  |
| Tabla 4. Comparativa entre metodologías de cálculo de huella de carbono aplicadas a infraestructuras del agua..... | 95  |
| Tabla 5. Límites operacionales por planta – Contrato ESAMUR .....  | 98  |
| Tabla 6. Aplicación de Alcance 3 en las plantas del contrato ESAMUR.....   | 99  |
| Tabla 7. comparación entre los principales estudios .....  | 101 |
| Tabla 8 Comparativa de aplicación de huella de carbono en EDAR (casos reales) .....                                | 103 |
| Tabla 9. Tipología de emisiones en una EDAR según origen y alcance .....   | 107 |
| Tabla 10. Principales categorías del Alcance 3 en EDAR: ejemplos y estrategias de reducción .....                  | 110 |
| Tabla 11. comparativa representativa de estudios .....   | 112 |
| Tabla 12. Comparativa entre bases de factores de emisión: DEFRA vs. ecoinvent.....                                 | 117 |
| Tabla 13. Comparativa entre datos primarios y datos secundarios en EDAR .....                                      | 119 |
| Tabla 14. Aplicación técnica de las categorías clave del Alcance 3 en el caso ESAMUR .....                         | 121 |
| Tabla 15. Factores de emisión por vía de tratamiento de residuos en EDAR .....                                     | 126 |
| Tabla 16. investigaciones y guías sobre residuos en EDAR (Categoría 5) .....                                       | 129 |
| Tabla 17. Factores de emisión típicos por modo de transporte (commuting).....                                      | 132 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 18 Factores de emisión por tipo de gasto en mantenimiento (kg CO <sub>2</sub> e/€) ..... | 135 |
| Tabla 19. limitaciones detectadas y soluciones aplicables .....                                | 139 |
| Tabla 20. Comparación entre tipos de datos usados en EDAR para Alcance 3 .....                 | 141 |
| Tabla 21. Límites operacionales aplicados a cada instalación del contrato ESAMUR .....         | 146 |
| Tabla 22. Esquema de recogida de datos por categoría de Alcance 3 .....                        | 148 |
| Tabla 23. Procedimientos de control de calidad aplicados en la herramienta de cálculo .....    | 154 |
| Tabla 24. Procedimientos de verificación cruzada y validación de datos por categoría .....     | 155 |
| Tabla 25. Ficha encuesta interna .....   | 156 |
| Tabla 26. Modelo de registro .....   | 158 |
| Tabla 27. Elementos incluidos en el contrato ESAMUR – Lote 9 Altiplano.....                    | 161 |
| Tabla 28 Comparativa climática y geográfica de los municipios atendidos .....                  | 164 |
| Tabla 29 Variables climáticas e hídricas clave en el área de estudio .....                     | 165 |
| Tabla 30. Capacidades y tecnologías de las EDAR del contrato ESAMUR.....                       | 168 |
| Tabla 31 Parámetros hidráulicos de diseño y operación – EDAR contrato ESAMUR Altiplano.....    | 169 |
| Tabla 32 Parámetros de diseño por instalación – EDAR contrato ESAMUR .....                     | 171 |
| Tabla 33. Capacidades y tecnologías de tratamiento por planta .....                            | 173 |
| Tabla 34. Esquema de procesos implementados en cada EDAR .....                                 | 174 |
| Tabla 35. Tecnologías y sus funciones específicas .....  | 185 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 36. Tecnología implementada en cada etapa del proceso por EDAR.....                                       | 186 |
| Tabla 37. Estimación de consumo energético mensual y anual en las EDAR del contrato ESAMUR .....                | 188 |
| Tabla 38. Coeficiente energético por volumen tratado en las EDAR del contrato ESAMUR.....                       | 189 |
| Tabla 39. Comparación de consumo energético con rangos IWA y AEAS .....   | 190 |
| Tabla 40. Indicadores de eficiencia energética por EDAR.....  | 191 |
| Tabla 41. Parámetros de gestión de lodos y emisiones asociadas.....   | 194 |
| Tabla 42 Volumen anual de subproductos y método de gestión.....   | 196 |
| Tabla 43. Volumen anual de residuos y emisiones asociadas (cálculo estimado) .....                              | 197 |
| Tabla 44. Distribución porcentual de residuos valorizados vs. eliminados .....                                  | 200 |
| Tabla 45. Distribución del personal técnico por planta .....  | 202 |
| Tabla 46. Actividades subcontratadas en el contrato ESAMUR .....  | 203 |
| Tabla 47 Distribución de recursos humanos por EDAR .....  | 205 |
| Tabla 48. Intervenciones de mantenimiento realizadas por subcontratistas (2024) .....                           | 206 |
| Tabla 49 Frecuencia, coste y distancia de mantenimiento subcontratado .....                                     | 207 |
| Tabla 50. Mantenimiento anual reportado por planta.....   | 208 |
| Tabla 51 Estimación de emisiones indirectas por transporte de residuos (Categoría 5 – Alcance 3) .....          | 211 |
| Tabla 52. Estimación de emisiones por desplazamientos operativos subcontratados (Categoría 7 – Alcance 3) ..... | 214 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 53 Estimación de emisiones por mantenimiento subcontratado (Categoría 1 – Alcance 3).                   | 216 |
| Tabla 54. Consolidación de emisiones indirectas por categoría del Alcance 3 .....                             | 219 |
| Tabla 55. Comparación de emisiones por Alcance (perfil parcial) .....   | 220 |
| Tabla 56. Validación metodológica y nivel de certeza por categoría del Alcance 3 .....                        | 222 |
| Tabla 57 ecuaciones aplicadas por categoría del Alcance 3 .....   | 223 |
| Tabla 58. Resumen de emisiones indirectas de GEI (Alcance 3) por categoría, estación y total anual .....      | 227 |
| Tabla 59. Intensidad de emisiones de GEI (Alcance 3) por estación, categoría y unidad funcional               | 229 |
| Tabla 60. comparativo .....   | 242 |
| Tabla 61. Comparativa de emisiones por categoría del Alcance 3 en EDAR urbanas .....                          | 246 |
| Tabla 62. Oportunidades de mejora en las principales categorías del Alcance 3 .....                           | 248 |
| Tabla 63. Supuestos técnicos aplicados y nivel de certeza estimado.....                                       | 253 |
| Tabla 64. Trazabilidad de supuestos por categoría y proceso.....  | 253 |
| Tabla 65. Criterios metodológicos adoptados en ausencia de medición directa.....                              | 255 |
| Tabla 66 Estimación del margen de incertidumbre en las emisiones calculadas por categoría del Alcance 3 ..... | 256 |
| Tabla 67. Comparativa internacional de emisiones de Alcance 3 en EDAR urbanas.....                            | 263 |

## Índice de figuras

|   |     |
|---|-----|
| Figura. 1. Distribución típica de emisiones GEI en una EDAR.....                                    | 32  |
| Figura. 2. Emisiones de N <sub>2</sub> O en EDAR Gestionadas por Aigües de Barcelona (2022) .....   | 33  |
| Figura. 3. Evolución de las Emisiones Globales de GEI (1990-2023) .....                             | 35  |
| Figura. 4. Consumo Energético en EDAR de España (2021) .....  | 37  |
| Figura. 5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en España (1990-2021).....                | 38  |
| Figura. 6. Distribución de Emisiones de GEI por Sector en España (2021).....                        | 40  |
| Figura. 7. Distribución de emisiones por Alcances (1, 2 y 3) en infraestructuras clave (2021) ..... | 46  |
| Figura. 8. Comparativa de Factores de Emisión: DEFRA vs. ecoinvent.....                             | 49  |
| Figura. 9. Emisiones de GEI Asociadas al Transporte en España (2021).....                           | 51  |
| Figura. 10. Comparación entre Huella Organizacional y Huella de Producto (LCA) .....                | 61  |
| Figura. 11. Evolución del Consumo Energético en EDAR y Transporte (2016-2021).....                  | 65  |
| Figura. 12. Comparativa de Metodologías de Cálculo en el Sector del Agua .....                      | 93  |
| Figura. 13. Distribución Estimada de Emisiones en una EDAR por Alcance .....                        | 105 |
| Figura. 14. Diagrama de flujo de emisiones en una EDAR según fase del proceso .....                 | 108 |
| Figura. 15. Distribución estimada de residuos generados en EDAR según tratamiento final.....        | 126 |
| Figura. 16. Factores de emisión por modo de transporte (g CO <sub>2</sub> e/km recorrido).....      | 131 |
| Figura. 17. Impacto relativo de las limitaciones en el cálculo de emisiones por mantenimiento ..    | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura. 18. Principales brechas en la contabilidad de emisiones en EDAR (ponderadas por impacto estimado)..... | 142 |
| Figura. 19. Hoja inicial para llenar de la herramienta desarrollada .....                                      | 149 |
| Figura. 20. Hoja de eliminación de residuos para llenar de la herramienta desarrollada.....                    | 150 |
| Figura. 21. Hoja de desplazamiento para llenar de la herramienta desarrollada.....                             | 151 |
| Figura. 22. Hoja de mantenimiento para llenar de la herramienta desarrollada .....                             | 151 |
| Figura. 23. Hoja reporte para llenar de la herramienta desarrollada .....                                      | 152 |
| Figura. 24. . Procedimientos de verificación cruzada y validación de datos por categoría .....                 | 156 |
| Figura. 25 EDAR de Yecla .....   | 162 |
| Figura. 26. EDAR de Jumilla .....  | 162 |
| Figura. 27. EDAR de Raspay .....   | 163 |
| Figura. 28. comarca del Altiplano murciano.....  | 165 |
| Figura. 29. Fangos activos.....  | 176 |
| Figura. 30. Aireación prolongada .....   | 177 |
| Figura. 31 coagulación – floculación .....   | 179 |
| Figura. 32 Filtración en arena .....   | 182 |
| Figura. 33 desinfección ultravioleta .....   | 183 |
| Figura. 34. Flujo esquemático de tecnologías aplicadas en EDAR del contrato ESAMUR .....                       | 184 |
| Figura. 35. Curvas de consumo energético por unidad funcional (kWh/m <sup>3</sup> ) .....                      | 191 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura. 36. Distribución de emisiones en la gestión de subproductos (Categoría 5) .....                                     | 194 |
| Figura. 37 Comparación de subproductos generados por EDAR .....   | 196 |
| Figura. 38 Distribución porcentual de emisiones por tipo de residuo .....   | 198 |
| Figura. 39. Rutas de gestión de residuos por tipo de residuo .....  | 200 |
| Figura. 40. Distribución del personal técnico por planta y función .....  | 202 |
| Figura. 41. Km recorridos por mantenimiento externo (impacto indirecto) .....   | 209 |
| Figura. 42. Distribución porcentual de emisiones por tipo de residuo gestionado (Categoría 5) ..                            | 212 |
| Figura. 43. Comparación de emisiones indirectas por categoría del Alcance 3.....  | 217 |
| Figura. 44 Distribución de emisiones indirectas por categoría – Alcance 3 (t CO <sub>2</sub> eq) .....                      | 232 |
| Figura. 45. Proporción de emisiones por tipo .....  | 234 |
| Figura. 46 Comparación de la distribución de emisiones por categoría (Alcance 3) entre métodos globales y desagregados..... | 265 |



## Introducción

### 1.1. Antecedentes y motivación

En las últimas décadas, el cambio climático se ha consolidado como uno de los principales desafíos globales y con ello ha surgido la necesidad de cuantificar con precisión las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en sectores industriales y de servicios; el tratamiento de aguas residuales, por su combinación de procesos energéticos, biológicos y logísticos, se encuentra entre las infraestructuras críticas con mayor potencial de impacto ambiental, lo cual ha sido ampliamente documentado en la literatura científica; la huella de carbono se erige en este contexto como una herramienta fundamental para la medición, control y reducción de las emisiones vinculadas a estas instalaciones, permitiendo identificar áreas prioritarias de mejora conforme a los compromisos internacionales de sostenibilidad y a las tendencias marcadas por organismos multilaterales; los avances metodológicos en la estimación y reporte de emisiones han propiciado una mayor exigencia en la gestión ambiental de infraestructuras urbanas, particularmente en lo referente a la gestión integral del ciclo del agua [1]; así, el desarrollo y aplicación de indicadores robustos para el seguimiento de las emisiones asociadas a EDAR es hoy un eje prioritario tanto para el sector público como privado; la presión regulatoria, unida a la demanda social de mayor transparencia, ha incrementado la relevancia de inventarios de GEI rigurosos y auditables; de esta manera, la gestión de la huella de carbono no solo representa una obligación legal sino un vector de competitividad en la economía circular; los estudios más recientes subrayan que la huella climática de las EDAR está lejos de ser un valor residual en el balance global de emisiones urbanas.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) cumplen una función clave en la protección de los ecosistemas y en la salud pública urbana, pero su operación genera tanto emisiones directas —por procesos de tratamiento biológico— como indirectas, derivadas del consumo energético, la gestión de residuos y los desplazamientos del personal; la bibliografía coincide en que estas emisiones deben ser inventariadas y clasificadas bajo marcos metodológicos reconocidos, tales como el GHG Protocol o la norma ISO 14064-1, que dividen las fuentes en tres alcances: emisiones directas (Alcance 1), indirectas por electricidad adquirida (Alcance 2) y todas las demás emisiones

indirectas (Alcance 3); esta clasificación, avalada por experiencias internacionales y normativas nacionales, permite desagregar los impactos y establecer líneas de actuación diferenciadas en función del tipo de fuente emisora; la correcta identificación y cuantificación de cada alcance es esencial para la elaboración de informes de sostenibilidad y para la comparación de resultados entre instalaciones, regiones o periodos temporales [2] [3]; además, la segmentación por alcances habilita la trazabilidad de las acciones de reducción y facilita la integración de la gestión del carbono en los sistemas de calidad ambiental; los procedimientos descritos por los principales estándares internacionales son hoy referencia ineludible en auditorías y certificaciones sectoriales; en síntesis, la clasificación por alcances constituye el marco básico sobre el que se sustenta toda estrategia climática en el sector del saneamiento urbano.

El análisis de ciclo de vida (LCA) ha sido ampliamente adoptado como metodología para evaluar la huella de carbono en sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que permite integrar en una única herramienta todas las etapas del proceso, desde la captación y el pretratamiento, hasta la disposición final de lodos y efluentes; este enfoque proporciona una visión holística de los impactos ambientales asociados y se considera una técnica robusta para la comparación de tecnologías, la planificación de infraestructuras y la elaboración de estrategias de mejora continua; la literatura especializada destaca que el LCA es particularmente útil en escenarios complejos donde confluyen múltiples flujos materiales, energéticos y logísticos, como sucede en las EDAR modernas; la robustez del método reside en su capacidad para atribuir cargas ambientales a cada etapa operativa, lo que facilita la identificación de puntos críticos y el diseño de intervenciones prioritarias [4]; en consecuencia, el uso de LCA ha permitido avanzar hacia una gestión integrada del carbono, alineando la operación técnica con los objetivos globales de sostenibilidad; la flexibilidad de la metodología posibilita su adaptación a distintas escalas, desde instalaciones puntuales hasta sistemas urbanos completos; la validación externa del LCA como herramienta sectorial ha sido refrendada tanto por organismos científicos como por agencias regulatorias, consolidándolo como estándar internacional en la evaluación ambiental de infraestructuras de agua.

Numerosos estudios han aplicado el LCA en EDAR con diferentes configuraciones de tratamiento, demostrando que los procesos biológicos, especialmente la aireación prolongada y la digestión anaerobia, son responsables de un alto porcentaje de las emisiones de gases como metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), ambos con un potencial de calentamiento global muy superior al  $\text{CO}_2$ ; además, estos procesos se ven afectados por variables operativas como la carga de materia orgánica, el tipo de reactor y el control de oxígeno disuelto, lo que incrementa la complejidad de la modelización de emisiones; a estos impactos se suman los derivados del consumo eléctrico, que pueden representar entre el 30 % y el 60 % de la huella total si no se dispone de fuentes renovables, tal como han demostrado evaluaciones recientes en escenarios europeos y latinoamericanos; el carácter intensivo en energía de las etapas de aireación y bombeo convierte a las EDAR en uno de los principales consumidores eléctricos del sector municipal [5]; los avances en monitorización han permitido cuantificar estos consumos con creciente exactitud, facilitando la integración de la eficiencia energética en los planes de reducción de emisiones; así, los resultados publicados respaldan la necesidad de considerar tanto las emisiones directas del proceso biológico como las asociadas al suministro energético externo; el balance de gases de efecto invernadero en EDAR requiere, por tanto, una aproximación multisectorial y multietapa para ser representativo de la realidad operativa.

La bibliografía también ha resaltado la importancia de considerar las emisiones indirectas en los análisis, especialmente aquellas clasificadas como Alcance 3; en este grupo se incluyen actividades como la gestión de residuos, los desplazamientos de empleados y los servicios subcontratados, que, si bien no son controlados directamente por la organización, forman parte integral del funcionamiento de la planta; esta categoría ha sido históricamente menos desarrollada en los inventarios, aunque recientes investigaciones indican que puede representar entre el 25 % y el 40 % de las emisiones totales en plantas medianas [6] [7]; la dificultad para acceder a datos operativos completos, así como la heterogeneidad de proveedores y flujos logísticos, han limitado la caracterización exhaustiva del Alcance 3 en muchos estudios; sin embargo, la tendencia actual apunta hacia una mayor integración de este tipo de emisiones en las estrategias climáticas corporativas, impulsada por la presión regulatoria y la demanda de transparencia en la cadena de valor; los métodos para cuantificar estas emisiones se han perfeccionado, incluyendo tanto

factores económicos como físicos, con el fin de aumentar la representatividad de los inventarios; la comparación internacional evidencia que aquellas organizaciones que incluyen el Alcance 3 presentan perfiles de huella más completos y consistentes con la realidad de su actividad.

El contrato ESAMUR (Altiplano), gestionado por Sacyr Agua, ofrece un contexto operativo ideal para el estudio del Alcance 3, ya que integra tres plantas activas (Yecla, Jumilla y Raspay), con documentación detallada sobre generación de residuos, desplazamientos de personal y servicios de mantenimiento; esta estructura organizativa facilita la obtención y validación de datos reales, condición indispensable para el desarrollo de inventarios auditables; la existencia de registros operativos sistematizados permite desagregar las emisiones por planta, actividad y tipo de flujo, lo cual es fundamental para identificar focos prioritarios de intervención; la utilización de bases de datos internas, junto con metodologías externas validadas, fortalece la trazabilidad de los resultados y su replicabilidad en otros contratos o contextos; el análisis pormenorizado del ciclo operativo de las tres plantas aporta un valor añadido al estudio, permitiendo diferenciar entre características locales, diferencias en configuración tecnológica y particularidades logísticas; en síntesis, el entorno ESAMUR constituye un caso de referencia para la aplicación de metodologías avanzadas en la estimación de emisiones indirectas en EDAR [8]; esta experiencia contribuye al desarrollo de herramientas adaptadas a la realidad del sector del agua en España.

Además del valor metodológico, este estudio responde a exigencias regulatorias cada vez más estrictas; normativas como el Reglamento CSRD de la Unión Europea o los criterios de la taxonomía de finanzas sostenibles obligan a las organizaciones a reportar su impacto climático de forma estandarizada, verificable y transparente [9]; esta dinámica regulatoria no solo responde a mandatos internacionales sino a una creciente presión por parte de los mercados y la ciudadanía; los informes de sostenibilidad climática se han convertido en elementos clave para el acceso a financiación, la participación en licitaciones públicas y la mejora de la imagen corporativa; la integración de la gestión de carbono en la gobernanza empresarial es hoy una condición esencial para la continuidad operativa de los gestores del ciclo del agua; así, el presente estudio se enmarca en una línea de investigación aplicada que anticipa las demandas futuras del sector y dota de herramientas concretas a las empresas y administraciones para cumplir los requisitos de

información ambiental exigidos; la estandarización de los procedimientos de cálculo facilita la auditoría externa y la comparabilidad interanual de los resultados, fortaleciendo la rendición de cuentas y la mejora continua.

En el caso específico de las EDAR, la necesidad de reducir emisiones no es solo normativa, sino también operativa; el coste energético, la generación de residuos y la movilidad del personal representan vectores clave de eficiencia, y su optimización permite no solo disminuir la huella de carbono, sino también mejorar la sostenibilidad económica del servicio; este enfoque integral entre sostenibilidad y eficiencia es central en el planteamiento del presente trabajo; la revisión de experiencias internacionales confirma que la reducción de emisiones asociadas a la gestión de residuos y a la logística interna impacta favorablemente en el balance económico de las plantas, al disminuir los costes operativos y los pagos por tasas ambientales [10]; la aplicación de indicadores de eficiencia carbónica constituye una ventaja competitiva frente a las exigencias normativas y del mercado; el control en tiempo real de los principales parámetros operativos mediante tecnologías digitales refuerza esta capacidad de gestión avanzada; por lo tanto, la gestión de la huella de carbono en EDAR se presenta no solo como un imperativo ambiental, sino también como una oportunidad de mejora integral del servicio prestado.

La implementación de herramientas de cálculo basadas en Excel, integradas con factores de emisión oficiales como los publicados por DEFRA, ecoinvent o MITECO, constituye una de las estrategias más eficaces para estimar emisiones indirectas en tiempo real; estos modelos permiten desglosar la huella por categoría, planta o actividad, generando indicadores precisos para auditorías o planes de mejora ambiental [11]; la automatización parcial de los cálculos, sumada a la actualización periódica de los factores de emisión, garantiza la validez de los resultados y su adaptación a nuevos contextos regulatorios; la flexibilidad del entorno Excel facilita la integración de datos de fuentes heterogéneas y la personalización de los informes para diferentes destinatarios; el uso de estos modelos ha demostrado reducir los errores de cálculo y aumentar la rapidez en la elaboración de inventarios, lo cual es especialmente relevante en entornos operativos con alta variabilidad estacional o cambios frecuentes en el régimen de explotación; en síntesis, la digitalización de la contabilidad ambiental es un eje estratégico para el futuro del sector.

Por ejemplo, la categoría 5 del Alcance 3, correspondiente a residuos generados en operaciones, puede calcularse a partir del tonelaje anual de residuos como lodos, arenas o tamices, multiplicado por el factor de emisión del tipo de tratamiento final (vertido, incineración, compostaje); este cálculo se ha estandarizado en bases como ecoinvent o en guías oficiales del MITERD [12]; la variabilidad de los factores de emisión según el destino final del residuo obliga a una caracterización cuidadosa de los procesos internos y de los proveedores de gestión externa; la sistematización de estos cálculos facilita la comparación entre plantas, años o contratos, permitiendo detectar tendencias y áreas de mejora; la literatura coincide en que la correcta estimación de las emisiones por residuos es esencial para el cumplimiento de los objetivos climáticos sectoriales; la existencia de herramientas homologadas para el cálculo de esta categoría constituye una garantía metodológica y una referencia para la replicabilidad de los resultados.

De forma análoga, la categoría 7 del Alcance 3, relativa a los desplazamientos de empleados, se estima utilizando encuestas de movilidad o registros internos de distancias recorridas, cruzados con factores de emisión por tipo de vehículo y energía; este componente resulta especialmente relevante en EDAR descentralizadas o rurales, como las del lote 9 de ESAMUR [13]; la diversidad de medios de transporte utilizados por el personal, junto con las diferencias en kilometraje anual, requiere la aplicación de metodologías de estimación flexibles y adaptadas a la realidad operativa; la utilización de factores de emisión diferenciados por tipología de vehículo incrementa la precisión del inventario y permite orientar las políticas de movilidad sostenible en la organización; la revisión bibliográfica señala que la movilidad interna y externa del personal puede suponer un porcentaje significativo de las emisiones indirectas en infraestructuras dispersas o de difícil acceso; la integración de la movilidad en la contabilidad ambiental de la planta es hoy un requisito para la elaboración de informes de sostenibilidad completos y alineados con los estándares internacionales.

El mantenimiento y conservación (parte de la categoría 1) es otra fuente significativa de emisiones indirectas; la movilidad de técnicos, el uso de materiales y equipos de sustitución, y las operaciones auxiliares pueden calcularse a partir de facturación, distancias recorridas o frecuencia de visitas, empleando factores monetarios o físicos adaptados al contexto [14]; la elección de la

metodología de cálculo depende de la disponibilidad y calidad de los registros operativos, así como de la especificidad de los servicios contratados; la literatura recomienda priorizar los datos físicos cuando sea posible, pero reconoce la validez de los factores económicos como proxy en escenarios de información limitada; la correcta asignación de emisiones a las actividades de mantenimiento permite identificar oportunidades de optimización y reducción de la huella, facilitando la negociación de cláusulas ambientales en los contratos de servicios externos; la comparación de alternativas de mantenimiento y la introducción de criterios de eficiencia carbónica en la planificación anual constituyen buenas prácticas para la gestión avanzada del ciclo de vida de las instalaciones.

La integración de todas estas categorías en un modelo único de cálculo no solo responde a las necesidades técnicas de la empresa gestora, sino también al objetivo académico del TFM: desarrollar una metodología replicable para la estimación de huella de carbono en EDAR, con especial énfasis en las emisiones de Alcance 3 [15]; este enfoque metodológico permite una aproximación integral a la gestión del carbono, incorporando tanto la dimensión operativa como la perspectiva estratégica de la organización; la validación cruzada de los resultados mediante auditorías internas y externas refuerza la credibilidad del inventario y su utilidad en procesos de mejora continua; la replicabilidad del modelo en otros contratos o contextos constituye un valor añadido para la transferencia de buenas prácticas sectoriales; la incorporación de tecnologías de digitalización y análisis de datos incrementa la capacidad de respuesta de la empresa ante cambios regulatorios o demandas del mercado; en síntesis, la metodología propuesta se presenta como una solución flexible y adaptada a la realidad de las EDAR gestionadas bajo régimen de externalización.

Desde el punto de vista técnico, esta aproximación permite comparar alternativas de operación, identificar puntos críticos de emisión y priorizar intervenciones de mejora; además, fortalece el proceso de toma de decisiones en auditorías, licitaciones o planificación estratégica, al contar con datos cuantitativos y trazables [16]; la disponibilidad de indicadores desagregados por planta, categoría o actividad posibilita la elaboración de informes personalizados para distintos destinatarios, incluyendo administraciones públicas, entes reguladores o equipos de gestión interna; la integración de los resultados en los sistemas de gestión ambiental corporativa

contribuye a la mejora de la eficiencia global y a la consolidación de una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad; la comparación de los datos obtenidos con referencias sectoriales o internacionales permite identificar fortalezas y áreas de oportunidad para la innovación; la utilización de benchmarking ambiental es hoy una herramienta clave en la competitividad del sector del agua.

Desde el punto de vista académico, este trabajo se inscribe en la línea de estudios que abordan el LCA en infraestructuras hídricas desde una perspectiva aplicada, incorporando datos reales, herramientas adaptadas al operador y orientación hacia la mejora operativa y ambiental [17]; la contribución principal reside en la adaptación de metodologías internacionales al contexto español, facilitando su aplicación por empresas gestoras y entidades públicas; la sistematización de los procedimientos y la transparencia en la presentación de resultados favorecen la transferencia de conocimiento y la capacitación técnica del personal implicado; la generación de documentación técnica accesible y replicable constituye un avance significativo frente a la dispersión y heterogeneidad de enfoques detectada en la literatura previa; la validación del modelo mediante comparación con experiencias reales y auditorías independientes fortalece la solidez de las conclusiones y sienta las bases para su generalización en el sector.

Asimismo, este enfoque metodológico contribuye a cubrir una laguna técnica: la falta de herramientas prácticas y verificables para estimar emisiones de Alcance 3 en plantas de tratamiento, especialmente en contratos de operación y mantenimiento donde la información está distribuida entre varios actores [18]; la descentralización de los registros y la diversidad de procedimientos internos representan barreras tradicionales para la elaboración de inventarios completos y auditables; la integración de la información mediante modelos digitales y la capacitación continua de los equipos técnicos constituyen factores clave para la superación de estas limitaciones; el desarrollo de protocolos de intercambio de datos y la estandarización de los formatos de registro operativos son recomendaciones recurrentes en la literatura para mejorar la calidad de los inventarios; la colaboración entre operadores, proveedores y administraciones públicas refuerza la capacidad del sector para responder a los desafíos climáticos y regulatorios del futuro inmediato.



La validación de los modelos desarrollados se realizará mediante la comparación con datos reales del contrato, informes de sostenibilidad elaborados por Sacyr, y auditorías previas realizadas por entidades como Aenor; esta fase permitirá evaluar la robustez y aplicabilidad del modelo propuesto [19]; la verificación externa de los resultados constituye una garantía de calidad y credibilidad para los informes de sostenibilidad generados; la integración de los resultados en la estrategia de gestión ambiental de la organización facilita el seguimiento de los objetivos climáticos y la identificación de nuevas líneas de mejora; la trazabilidad de los datos y la transparencia en la presentación de resultados incrementan la confianza de los grupos de interés y favorecen el acceso a financiación y certificaciones ambientales; en síntesis, la validación continua de las metodologías y resultados constituye un pilar esencial para la consolidación de una gestión avanzada de la huella de carbono en el sector del agua..

## **1.2. Justificación del proyecto**

La evaluación de la huella de carbono en infraestructuras críticas se ha convertido en una exigencia técnica y normativa dentro del contexto de mitigación del cambio climático. Particularmente en el caso de las EDAR, la generación de emisiones no se limita a procesos internos controlados (Alcance 1 y 2), sino que abarca actividades indirectas asociadas a la gestión de residuos, transporte de personal y servicios subcontratados, que se clasifican dentro del Alcance 3. Estas fuentes de emisión representan, según estudios recientes, entre un 25 % y un 40 % del impacto total de las instalaciones de saneamiento, lo que justifica la necesidad de su medición precisa y trazable [1].

La relevancia de abordar el Alcance 3 no solo responde a criterios metodológicos, sino también a demandas explícitas de reguladores, auditores y empresas certificadoras. El presente TFM se justifica en tanto que plantea el desarrollo y aplicación de una metodología adaptada al contrato real de Sacyr en el lote ESAMUR de Murcia, con acceso a datos operativos históricos. Esta información habilita el cálculo directo de emisiones para categorías críticas como residuos (Categoría 5), desplazamientos (Categoría 7) y mantenimiento (parte de la 1), utilizando herramientas Excel estructuradas y factores oficiales (DEFRA, ecoinvent, MITECO) [2].

A diferencia de estudios basados exclusivamente en estimaciones teóricas, este trabajo se fundamenta en datos reales extraídos de hojas de seguimiento, informes de subcontratistas y memorias de residuos, aportados por la empresa. Esta integración permite validar la herramienta desarrollada y ajustar los factores de emisión a las condiciones específicas del contrato, lo que aumenta la robustez técnica y la replicabilidad del modelo. Así, el TFM trasciende el plano académico para ofrecer un instrumento aplicable a otras plantas gestionadas por la organización [3].

La alineación con marcos internacionales como el GHG Protocol y la norma ISO 14064-1 es otra razón clave que justifica el desarrollo del presente proyecto. Estos estándares no solo establecen criterios de clasificación y cálculo, sino que también son exigidos por programas de certificación ambiental, como el Registro de Huella de Carbono del MITERD o las auditorías de Aenor. Incorporar este marco metodológico garantiza la comparabilidad de resultados y facilita su uso en contextos de verificación externa [4].

Desde una perspectiva empresarial, el modelo propuesto aporta valor en tres dimensiones: primero, optimiza la trazabilidad de emisiones indirectas; segundo, permite detectar puntos críticos de mejora operativa; y tercero, consolida la estrategia ambiental de la compañía frente a clientes, reguladores y auditores. La visualización de resultados por categoría y por planta refuerza la toma de decisiones y favorece el diseño de planes de reducción concretos, con indicadores cuantificables y monitoreables a lo largo del tiempo [5].

Por último, el enfoque propuesto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (acción por el clima), consolidando su valor técnico, normativo y ético. La herramienta desarrollada no solo cuantifica emisiones, sino que habilita su gestión estratégica mediante un modelo replicable, transparente y basado en evidencia. En este sentido, el TFM contribuye a cerrar una brecha metodológica existente en el sector del agua, ofreciendo una propuesta orientada a resultados, fundamentada científicamente y validada en condiciones reales de operación [6].

### **1.3. Objeto y alcance del TFM**

El objeto principal del presente Trabajo de Fin de Máster es desarrollar una metodología precisa, trazable y replicable para la cuantificación de la huella de carbono en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), con especial énfasis en las emisiones indirectas clasificadas como Alcance 3 según el GHG Protocol [1]. A diferencia de los enfoques tradicionales centrados en emisiones directas y consumo energético, este proyecto se focaliza en aquellas categorías menos exploradas, pero cada vez más relevantes, que incluyen residuos, desplazamientos del personal y mantenimiento subcontratado.

Esta delimitación responde a la necesidad práctica de cubrir vacíos metodológicos en inventarios ambientales reales, como los realizados en plantas operadas por Sacyr en el marco del contrato ESAMUR. Si bien las emisiones de Alcance 1 y 2 han sido abordadas por diversas metodologías normativas y literatura consolidada [2], las emisiones de Alcance 3 siguen representando un reto técnico importante en términos de acceso a datos, validación y trazabilidad.

La metodología propuesta combina herramientas de análisis de ciclo de vida (LCA) con datos reales de operación facilitados por la empresa gestora. Esto incluye registros históricos de residuos gestionados, distancias de desplazamiento del personal y actividades de mantenimiento documentadas en hojas Excel, lo que permite transformar datos estimados en datos primarios verificados [3]. Esta integración mejora sustancialmente la calidad del inventario final.

El enfoque se alinea con normas internacionales como la ISO 14064-1 y las directrices del GHG Protocol Corporate Standard, que establecen los principios de relevancia, consistencia, transparencia, completitud y precisión para la cuantificación de emisiones [4]. De este modo, los resultados obtenidos serán no solo técnicamente sólidos, sino también útiles para procesos de auditoría y certificación, como los realizados por Aenor o el Registro de Huella de Carbono del MITERD.

El proyecto se aplica a un caso concreto: el Lote 9 del contrato de operación de EDAR del Altiplano (Murcia), que incluye las instalaciones de Yecla, Jumilla y Raspay. Estas plantas cuentan con

tratamiento terciario y una red de depuración de 6.800 km, lo que les confiere una representatividad significativa dentro del sistema autonómico de saneamiento [5]. Además, se dispone de datos operativos actualizados que respaldan la calidad de los cálculos realizados.

El estudio abarca exclusivamente las categorías del Alcance 3 con mayor peso y potencial de mejora: residuos (Categoría 5), desplazamientos del personal (Categoría 7) y servicios de mantenimiento (parte de la Categoría 1). Estas fueron seleccionadas por su impacto potencial, disponibilidad de datos y relevancia operativa, en función del análisis preliminar realizado junto al equipo técnico de Sacyr [6].

La herramienta desarrollada consistirá en una hoja de cálculo automatizada en Excel que permita introducir datos de actividad (kg de residuos, km recorridos, gasto económico) y convertirlos en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente mediante la aplicación de factores de emisión contrastados [7]. La fórmula base utilizada es: Emisiones = Actividad × Factor de emisión, adaptada por categoría según DEFRA, ecoinvent o MITERD.

Cada subcategoría incluirá su propia lógica de cálculo. Para residuos, se utilizarán los tipos de tratamiento final como variable principal (compostaje, valorización energética, vertedero). Para desplazamientos, se considerarán factores por tipo de transporte y frecuencia semanal. Para mantenimiento, se aplicarán factores económicos si no se dispone de detalle técnico, como establece el GHG Scope 3 Standard [8].

Además, la herramienta incluirá un sistema de validación cruzada con datos operativos previos, de forma que las cifras generadas puedan contrastarse con registros históricos, memorias técnicas o declaraciones de subcontratistas. Esto permitirá la aplicación directa de los resultados en auditorías internas y externas [9].

El proyecto excluye deliberadamente las emisiones de Alcance 1 (proceso biológico) y Alcance 2 (electricidad), ya que estas cuentan con metodologías consolidadas, y su inclusión desviaría el enfoque hacia áreas ya exploradas. Esta decisión permite una mayor profundidad en la

caracterización y cuantificación de las emisiones indirectas, que hasta ahora han sido tratadas de forma marginal en la práctica operativa [10].

Desde el punto de vista académico, el alcance del trabajo incluye la revisión de literatura científica aplicada al LCA en el tratamiento de aguas residuales, así como el análisis de las metodologías aplicadas en contextos similares. Estudios como los de Foley et al. [11], Corominas et al. [12] o Rodríguez-García et al. [13] sirven de base para adaptar y validar el enfoque adoptado.

El TFM también integra el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 13 (acción por el clima) y el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), contribuyendo a una mejor gestión de las emisiones dentro del sector del agua [14]. Esto refuerza la alineación del proyecto no solo con las necesidades empresariales, sino también con las metas globales de sostenibilidad.

Uno de los valores añadidos del proyecto es que se construye sobre un entorno de datos reales, lo que permite romper con el modelo tradicional de estimaciones genéricas. Esta aproximación fortalece el vínculo entre teoría y práctica, y dota al trabajo de una robustez que le permite ser utilizado directamente como herramienta de gestión ambiental en planta [15].

En cuanto a la temporalidad del estudio, se establecerá un periodo de referencia anual para la cuantificación de emisiones, utilizando datos del ejercicio más reciente con registros completos. Esta decisión responde a las exigencias de comparabilidad de los sistemas de reporte ambiental, como las establecidas por la OECC [16].

El alcance del análisis no se limita a la generación de datos, sino que incluye también la interpretación de resultados mediante análisis gráfico, identificación de puntos críticos y formulación de recomendaciones. Esto convierte al TFM en una propuesta integral que abarca desde la cuantificación hasta la estrategia [17].

A nivel operativo, se establecerán criterios de calidad de datos (grado de exactitud, disponibilidad, trazabilidad) para cada categoría. En los casos donde no se disponga de datos primarios, se aplicarán criterios de sustitución con fuentes secundarias debidamente justificadas, como recomienda la ISO 14064-1 [18].

Asimismo, el proyecto contempla la generación de resultados comparables entre plantas, de forma que se pueda evaluar la huella de carbono total por instalación, y segmentar por categoría para identificar las áreas de mayor impacto. Esta estructura facilita el diseño de acciones de mejora específicas, con retorno ambiental y económico [19].

Se plantea como producto del TFM no solo la entrega del informe académico, sino también una herramienta funcional para la empresa, con posibilidad de adaptarse a otros contratos o plantas bajo su operación. Esta doble aplicabilidad —académica y profesional— justifica el esfuerzo metodológico invertido y posiciona el trabajo como un referente para futuras aplicaciones [20].

## **Objetivos del TFM**

### **2.1. Objetivo general**

Desarrollar una metodología integral y replicable para cuantificar la huella de carbono en una planta de tratamiento de aguas residuales (EDAR), con especial énfasis en las emisiones indirectas (Alcance 3) derivadas de la gestión de residuos, los desplazamientos de empleados y las actividades de mantenimiento.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar e implementar una herramienta en Excel que integre datos reales de actividad operativa, permitiendo calcular de forma sistemática las emisiones en t CO<sub>2</sub> eq para las categorías de residuos (Categoría 5), desplazamiento de empleados (Categoría 7) y mantenimiento (parte de la Categoría 1).
- Recopilar y analizar datos históricos proporcionados por Sacyr referentes a la generación de residuos, el comportamiento de desplazamiento de empleados y los consumos asociados a actividades de mantenimiento, asegurando que la información sea completa y representativa del contrato ESAMUR.
- Validar la metodología desarrollada mediante la comparación de los resultados obtenidos con estudios previos en la literatura, y mediante la participación en la auditoría de Huella

de Carbono realizada por Aenor, de manera que se demuestre la fiabilidad y aplicabilidad de la herramienta en un entorno real.

- Proponer medidas de mejora y estrategias de reducción de emisiones específicas para cada categoría evaluada, basadas en el análisis de los resultados alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (especialmente ODS 13, Acción por el Clima), contribuyendo a la sostenibilidad global de la EDAR.
- Establecer un marco de análisis replicable que permita extrapolar la metodología y los hallazgos a otras instalaciones de tratamiento de aguas, facilitando la toma de decisiones en el sector y promoviendo la estandarización de procesos de medición ambiental a nivel regional e internacional

## **Estado del Arte**

### **3.1. Introducción general al concepto de Huella de Carbono**

La evolución del concepto de huella de carbono está estrechamente ligada al reconocimiento del cambio climático como una amenaza global. Inicialmente, esta métrica se utilizó en estudios de ciclo de vida para cuantificar las emisiones asociadas al consumo de bienes, pero rápidamente se extendió a organizaciones, territorios y sectores económicos específicos debido a su utilidad en la toma de decisiones estratégicas [3]. La normalización del concepto a través de marcos como el GHG Protocol (2004) y las normas ISO 14064 (2006) y 14067 (2013) ha sido clave para su consolidación como herramienta de gestión climática y ambiental.

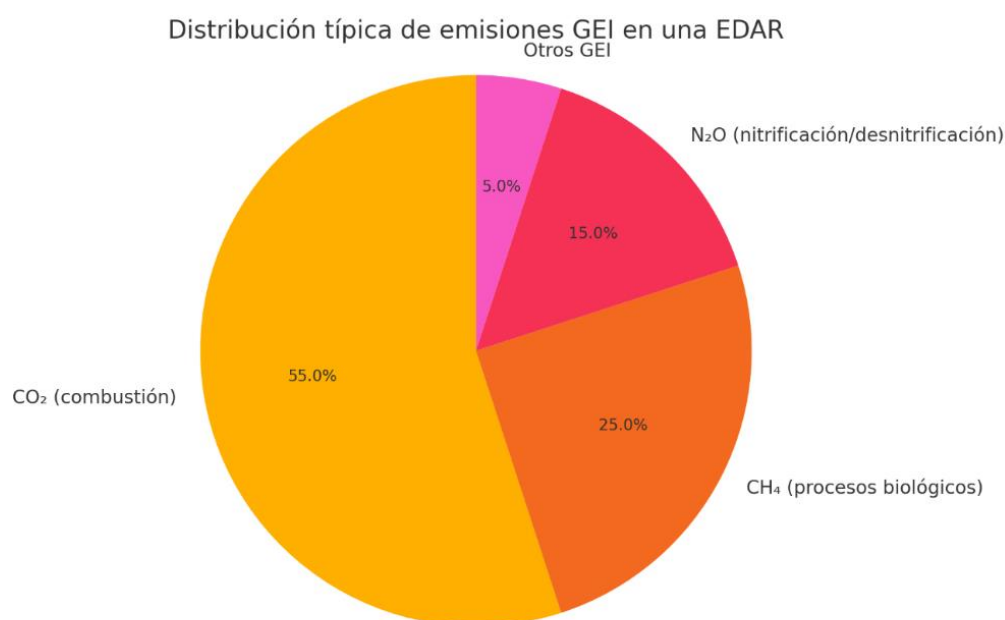
La huella de carbono considera seis gases principales definidos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC): dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ). Todos ellos se expresan en una unidad común: toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{tCO}_2\text{e}$ ), lo que permite homogeneizar y comparar los impactos climáticos de distintas fuentes de emisión [4].

En el ámbito de las organizaciones, la huella de carbono se convierte en un indicador clave de desempeño ambiental, ya que proporciona información cuantificable para establecer metas de

reducción, cumplir con regulaciones o participar en mecanismos voluntarios de mercado como compensación o neutralidad climática [5]. Esto es especialmente relevante en sectores con un alto consumo energético o uso intensivo de recursos, como el tratamiento de aguas residuales.

El interés por cuantificar la huella de carbono en el sector del agua ha crecido considerablemente, impulsado por la presión normativa, la necesidad de reducir costes operativos y la transición hacia infraestructuras sostenibles. Estudios como los de Foley et al. [1] y Corominas et al. [2] han demostrado que el análisis de emisiones en EDAR puede generar información crítica sobre eficiencia, priorización de inversiones y rediseño de procesos con menor carga climática.

Figura. 1. Distribución típica de emisiones GEI en una EDAR



Fuente: Elaboración propia a partir de [1] [4]

La huella de carbono no solo se limita al análisis operativo, sino que también puede integrarse a enfoques de ciclo de vida (LCA), lo que permite incorporar impactos desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Este tipo de evaluación resulta fundamental para



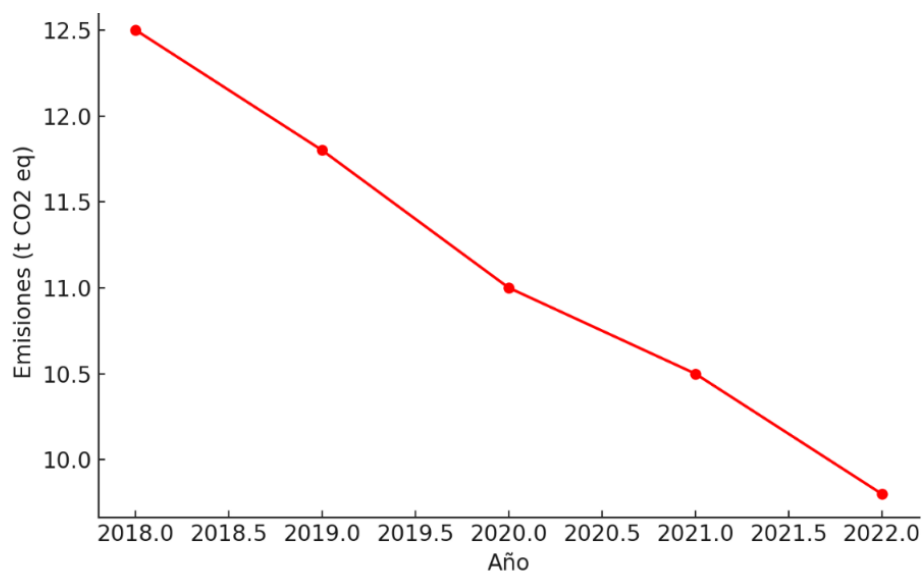
decisiones de carácter estructural, como la selección de tecnologías, materiales o estrategias de mantenimiento [6].

Actualmente, múltiples gobiernos y entidades reguladoras exigen la cuantificación de emisiones de GEI como parte de los compromisos climáticos nacionales e internacionales. En Europa, la Directiva 2022/2464 sobre información corporativa en sostenibilidad (CSRD) establece obligaciones explícitas sobre la medición y divulgación de la huella de carbono en grandes organizaciones, lo que refuerza su papel en la planificación estratégica [7].

### **3.1.1 Cambio climático y gases de efecto invernadero (GEI)**

El cambio climático se ha convertido en uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI, impulsado en gran parte por el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Estos gases, tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), retienen el calor emitido por la Tierra, alterando el balance energético del planeta y provocando un aumento gradual en la temperatura global [1]. La magnitud y la persistencia del efecto invernadero han llevado a la comunidad científica y a los responsables políticos a enfocarse en estrategias de reducción de emisiones, ya que la mitigación de estos gases resulta fundamental para evitar consecuencias climáticas irreversibles. La revisión de estudios en diversas industrias ha evidenciado que la implementación de metodologías precisas para la cuantificación de GEI es esencial para diseñar políticas ambientales efectivas.

Figura. 2. Emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  en EDAR Gestionadas por Aigües de Barcelona (2022)



Fuente: Retema, "Alcanzando la neutralidad climática: monitorización y gestión en tiempo real".

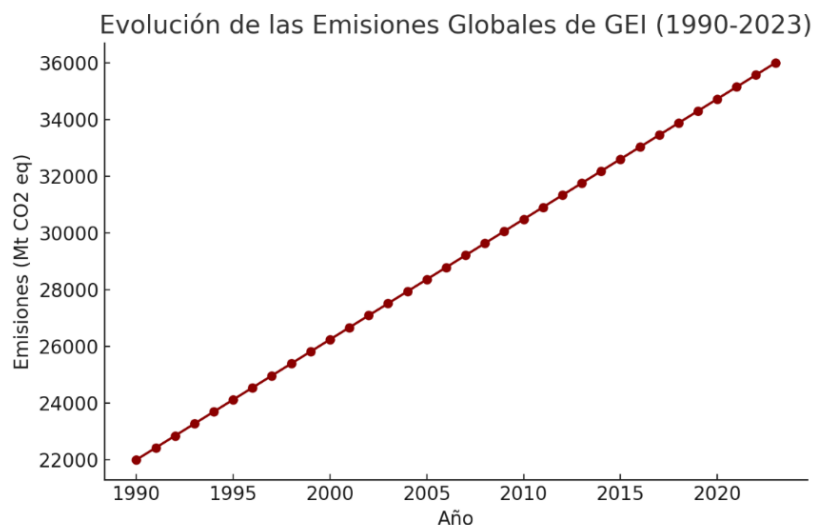
Los GEI son compuestos con propiedades radiativas que, aunque presentes en bajas concentraciones, tienen la capacidad de absorber y reemitir la radiación infrarroja. Este proceso natural, que en condiciones equilibradas es indispensable para mantener una temperatura adecuada en la Tierra, se ve intensificado cuando las concentraciones de estos gases se elevan debido a actividades antropogénicas [2]. En particular, la industrialización y el crecimiento urbano han contribuido de forma significativa al incremento de estos compuestos, alterando el clima global. La importancia de comprender estos mecanismos radica en la necesidad de identificar las fuentes de emisiones y establecer medidas de control que permitan una reducción sostenida en la atmósfera. De este modo, el conocimiento profundo de la química y la física detrás de los GEI se convierte en la base para desarrollar estrategias de mitigación eficaces.

La distinción entre fuentes naturales y antropogénicas de GEI es crucial para la elaboración de inventarios de emisiones. Mientras que procesos naturales como la respiración y la descomposición de materia orgánica forman parte del ciclo biogeoquímico, las actividades humanas –incluyendo la combustión de combustibles fósiles, la deforestación y ciertos procesos industriales– han alterado este equilibrio de manera drástica [3]. La capacidad para diferenciar estas fuentes permite focalizar las políticas de reducción de emisiones en aquellas actividades

donde la intervención humana es determinante. Esta diferenciación es especialmente relevante en sectores como el tratamiento de aguas residuales, donde tanto los procesos naturales como los inducidos por la actividad operativa pueden contribuir a la emisión total de GEI. El análisis detallado de cada fuente es, por tanto, un paso indispensable para diseñar intervenciones dirigidas.

El mecanismo del efecto invernadero se basa en la absorción de la radiación infrarroja por parte de los GEI y en su reemisión en todas las direcciones, incluyendo hacia la superficie terrestre. Este proceso natural se ve amplificado cuando las concentraciones de GEI aumentan, generando un incremento en la temperatura global que se traduce en fenómenos meteorológicos extremos y cambios en los patrones climáticos [4]. La explicación detallada de este mecanismo ha sido fundamental para concienciar sobre la importancia de reducir las emisiones, ya que incluso un pequeño incremento en la concentración de GEI puede tener consecuencias significativas en el clima global. La capacidad para cuantificar este impacto es esencial para justificar la implementación de políticas ambientales y para orientar la innovación tecnológica en sectores críticos.

Figura. 3. Evolución de las Emisiones Globales de GEI (1990-2023)



Fuente: El País, "Las emisiones globales marcan un nuevo récord mientras crece el riesgo de otra década perdida en la lucha climática".

La Revolución Industrial marcó un antes y un después en el equilibrio de la atmósfera, debido al uso masivo de combustibles fósiles para impulsar la maquinaria y el transporte. Desde entonces, las concentraciones de CO<sub>2</sub> y otros GEI han aumentado de forma sostenida, siendo este incremento el principal impulsor del cambio climático actual [5]. La transformación de la economía y la expansión urbana han generado una demanda energética que, sin intervenciones adecuadas, conduce a una mayor liberación de GEI. El análisis histórico de las emisiones permite establecer tendencias y proyectar escenarios futuros, lo que resulta indispensable para la planificación a largo plazo en políticas ambientales y estrategias empresariales. Este contexto histórico resalta la urgencia de adoptar medidas correctivas en todos los sectores, incluyendo aquellos menos evidentes, como las emisiones indirectas en infraestructuras de tratamiento de aguas.

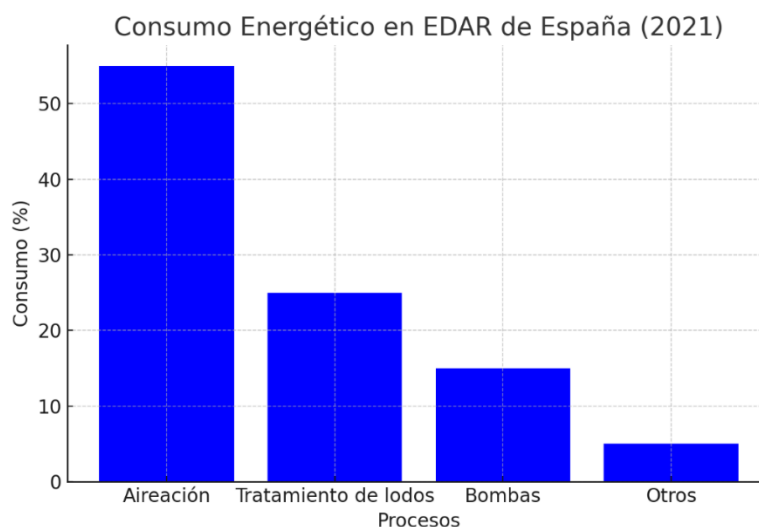
El aumento de la temperatura global, derivado del incremento en las concentraciones de GEI, tiene consecuencias profundas en el medio ambiente y en la sociedad. Entre los efectos más notables se encuentran el derretimiento de los glaciares, la elevación del nivel del mar, la alteración de patrones de precipitación y la mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos [6].

Estos cambios afectan no solo a los ecosistemas naturales, sino también a la infraestructura humana, generando costos económicos elevados y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y la disponibilidad de agua. La reducción de las emisiones de GEI es, por tanto, una necesidad imperativa para evitar escenarios catastróficos, y constituye el objetivo central de numerosas iniciativas internacionales y políticas nacionales orientadas a la mitigación del cambio climático.

La relevancia de la reducción de emisiones se extiende a múltiples ámbitos, desde la economía hasta la salud pública y la estabilidad ecológica. La disminución de los GEI es fundamental para limitar el calentamiento global y, por ende, para preservar los ecosistemas y garantizar condiciones de vida adecuadas para las generaciones futuras [7]. En este sentido, la adopción de tecnologías limpias y la mejora en la eficiencia energética son estrategias clave para lograr una disminución significativa en la huella de carbono. La implementación de metodologías rigurosas para cuantificar las emisiones permite a las empresas identificar sus puntos críticos y desarrollar planes de acción concretos, lo que refuerza la necesidad de avanzar hacia una economía baja en carbono. La aplicación de estas estrategias resulta particularmente importante en sectores con alto impacto ambiental, como el tratamiento de aguas residuales.

El sector del agua, y en particular las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR), representan una fuente relevante de emisiones de GEI tanto directas como indirectas. Las EDAR no solo generan emisiones a través de la combustión de combustibles para su operación, sino también mediante procesos biológicos y el manejo de lodos, que pueden liberar metano y óxido nitroso [8]. La evaluación de la huella de carbono en este sector es, por tanto, crucial para identificar oportunidades de mejora y para orientar la inversión en tecnologías más sostenibles. La aplicación de metodologías de LCA permite desglosar el impacto ambiental de cada etapa del proceso, facilitando la identificación de las áreas de mayor potencial de reducción. Este análisis es esencial para lograr una operación más eficiente y para cumplir con los objetivos normativos y de sostenibilidad que exigen cada vez más transparencia en la contabilidad de GEI.

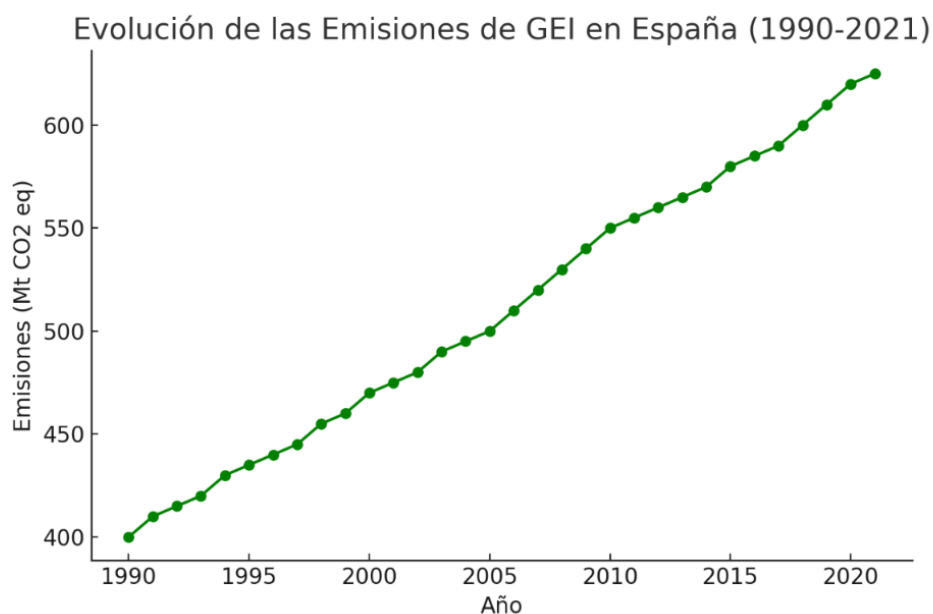
Figura. 4. Consumo Energético en EDAR de España (2021)



Fuente: Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), "Encuesta Nacional de Suministro de Agua Potable y Saneamiento".

La exposición de los GEI y su impacto en la salud y el medio ambiente ha llevado a la adopción de regulaciones internacionales y nacionales que exigen la reducción de emisiones y la mejora en la eficiencia de los procesos industriales [9]. Estudios recientes han documentado cómo la exposición prolongada a altos niveles de GEI puede contribuir a problemas respiratorios, cardiovasculares y a una mayor incidencia de enfermedades crónicas en la población. Además, los costos económicos asociados a la gestión de los impactos del cambio climático, como la pérdida de infraestructura y la degradación de los ecosistemas, son cada vez mayores. En este contexto, la reducción de las emisiones de GEI no solo es una cuestión ambiental, sino también una prioridad de salud pública y económica, lo que subraya la importancia de implementar estrategias efectivas de mitigación en todos los sectores.

Figura. 5. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en España (1990-2021)



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero".

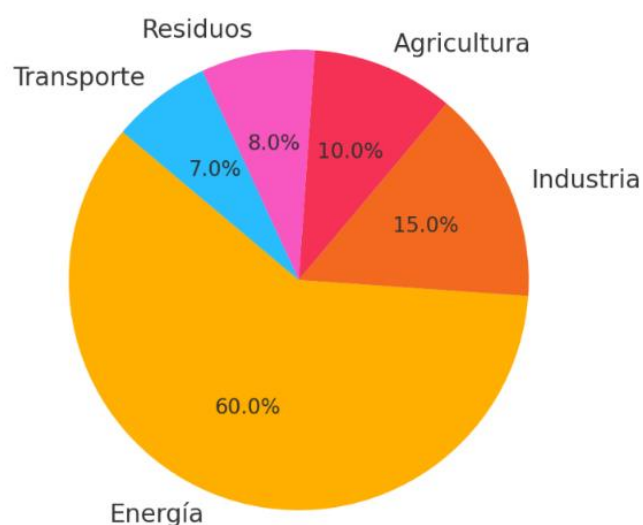
La aplicación de metodologías de LCA ha demostrado ser fundamental para la evaluación de la huella de carbono, permitiendo una cuantificación detallada de las emisiones a lo largo de todo el ciclo de vida de un proceso [10]. Este enfoque integral facilita la identificación de los puntos críticos de emisión, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones. En el contexto de las EDAR, la metodología LCA permite comparar diferentes alternativas tecnológicas y operativas, identificando aquellas que ofrecen una mayor eficiencia ambiental y una reducción significativa de GEI. La capacidad de evaluar distintas configuraciones y escenarios operativos es indispensable para desarrollar estrategias de reducción de emisiones que sean tanto efectivas como económicamente viables. La transparencia en el cálculo de las emisiones y la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad son elementos clave que refuerzan la utilidad de este enfoque en el diseño de políticas ambientales.

La eficiencia energética es uno de los pilares fundamentales en la reducción de las emisiones de GEI, ya que el consumo de energía es una fuente importante de emisiones indirectas. Estudios han

demostrado que la optimización del consumo eléctrico y térmico en los procesos industriales puede generar reducciones significativas en la huella de carbono [11]. La implementación de tecnologías de control y gestión avanzada permite ajustar los parámetros operativos en tiempo real, minimizando el uso innecesario de energía y, por ende, las emisiones asociadas. Este enfoque no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también se traduce en ahorros económicos para las empresas, lo que refuerza la viabilidad de invertir en mejoras tecnológicas. La integración de prácticas de eficiencia energética en el diseño y la operación de infraestructuras críticas es, por tanto, una estrategia imprescindible para alcanzar objetivos de sostenibilidad ambiental.

Figura. 6. Distribución de Emisiones de GEI por Sector en España (2021)

### Distribución de Emisiones de GEI por Sector en España (2021)



Fuente: MITECO, "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero".

Uno de los desafíos en la cuantificación de GEI radica en la variabilidad y la incertidumbre de los datos de actividad y de los factores de emisión empleados en los cálculos [12]. La utilización de fuentes reconocidas, como los factores de emisión publicados por DEFRA y complementados con información de ecoinvent, permite mitigar en parte esta incertidumbre, aunque siempre existe un



margen de error inherente a la medición y modelización de procesos complejos. La estandarización de los métodos de cálculo y la adopción de normativas internacionales son estrategias fundamentales para asegurar la consistencia y la comparabilidad de los inventarios de GEI. La precisión en la estimación de las emisiones es crucial para que las estrategias de reducción sean efectivas y se puedan implementar medidas correctivas con certeza. El desarrollo de técnicas de análisis de sensibilidad y la incorporación de rangos de incertidumbre son prácticas que fortalecen la robustez de los resultados y facilitan la toma de decisiones basadas en datos sólidos.

La innovación tecnológica juega un papel central en la reducción de las emisiones de GEI, ofreciendo soluciones que permiten optimizar procesos y mejorar la eficiencia en la gestión de recursos [13]. La adopción de tecnologías avanzadas, tales como sistemas inteligentes de control, sensores y algoritmos de optimización multiobjetivo, ha demostrado ser eficaz para reducir el consumo de energía y, por ende, las emisiones asociadas a la operación de infraestructuras críticas. En el sector del tratamiento de aguas residuales, estas innovaciones no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también contribuyen a la sostenibilidad global, reduciendo el impacto ambiental de las plantas. La inversión en tecnologías limpias y la integración de sistemas de monitoreo continuo son estrategias que permiten detectar a tiempo desviaciones en el rendimiento ambiental y aplicar medidas correctivas de forma oportuna. Este enfoque tecnológico es fundamental para enfrentar los retos del cambio climático y para garantizar un futuro sostenible.

La formulación de políticas ambientales a nivel global se ha orientado cada vez más hacia la reducción de las emisiones de GEI, estableciendo metas ambiciosas que requieren la colaboración de gobiernos, empresas y sociedad civil. Iniciativas internacionales como el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 13, han impulsado la adopción de medidas concretas para mitigar el cambio climático [1, 2]. La relevancia de estas políticas radica en que establecen un marco normativo y financiero que incentiva la inversión en tecnologías de reducción de emisiones y en la mejora de la eficiencia operativa. En este contexto, la cuantificación precisa de las emisiones se vuelve indispensable para monitorear el progreso y ajustar las estrategias a nivel nacional e internacional. La implementación de inventarios de GEI que sigan

estándares internacionales facilita la rendición de cuentas y permite a las empresas demostrar su compromiso con la sostenibilidad ambiental, lo cual es cada vez más valorado en el ámbito global.

La transparencia y la comparabilidad en el reporte de GEI son aspectos clave para la evaluación de los impactos ambientales y para la elaboración de estrategias de mitigación eficaces. La adopción de estándares internacionales como ISO 14064 y el GHG Protocol permite que los inventarios sean consistentes y puedan ser comparados entre diferentes sectores y regiones [3, 4]. Esta homogeneidad en la medición es fundamental para identificar tendencias, evaluar el desempeño ambiental y establecer metas de reducción de emisiones que sean ambiciosas pero alcanzables. La utilización de metodologías estandarizadas facilita la verificación y validación de los datos, lo que a su vez incrementa la credibilidad de los informes ambientales y fortalece la confianza de los stakeholders. En este sentido, la integración de datos reales y la aplicación de factores de emisión reconocidos son elementos esenciales para lograr un reporte transparente y riguroso, que contribuya a la toma de decisiones estratégicas en la gestión ambiental.

La reducción de las emisiones de GEI es un objetivo central en la lucha contra el cambio climático, y su importancia se refleja en la necesidad de desarrollar y aplicar metodologías precisas para cuantificar el impacto ambiental de las actividades humanas. La implementación de estrategias de reducción no solo contribuye a mitigar el calentamiento global, sino que también mejora la calidad del aire, reduce los riesgos para la salud pública y genera beneficios económicos al optimizar el uso de los recursos [5, 6]. La adopción de tecnologías y prácticas que disminuyan la huella de carbono es fundamental para transitar hacia una economía sostenible, en la que la eficiencia energética y la innovación tecnológica sean los pilares de la operación industrial. La integración de inventarios de GEI en la planificación estratégica de las empresas permite identificar áreas de oportunidad y diseñar medidas de reducción que sean tanto rentables como efectivas, lo que refuerza la relevancia de este objetivo en el contexto global actual.

El sector del agua tiene un impacto significativo en el cambio climático, ya que abarca procesos que demandan un alto consumo energético y generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en diversas etapas, desde la captación y distribución hasta el tratamiento y la disposición final

de aguas residuales [1,2]. Las operaciones de bombeo, tratamiento y distribución, a menudo alimentadas por fuentes de energía no renovables, contribuyen de forma sustancial a la emisión de CO<sub>2</sub> y otros GEI, lo que afecta directamente el balance térmico de la atmósfera [1].

Además, las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) generan emisiones tanto directas como indirectas. Por ejemplo, en las fases biológicas se producen emisiones de metano y óxido nitroso, gases con un potencial de calentamiento global considerable, mientras que el consumo eléctrico para operar estos procesos se traduce en emisiones indirectas si la energía proviene de fuentes fósiles [2,3]. La complejidad de estas operaciones implica que, a lo largo del ciclo de vida de las infraestructuras hídricas, se producen múltiples flujos de GEI que pueden sumar una fracción importante de la huella de carbono total de una ciudad, especialmente en contextos de alta densidad poblacional [2].

La gestión ineficiente del agua y la falta de optimización en las infraestructuras pueden agravar el problema, generando un círculo vicioso en el que el aumento del consumo energético contribuye a mayores emisiones, exacerbando así los efectos del cambio climático [7]. Por ello, es fundamental que las entidades responsables implementen tecnologías avanzadas y estrategias de eficiencia energética, que no solo reduzcan el consumo, sino que también disminuyan las emisiones asociadas a cada fase del ciclo del agua [8].

En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se ha consolidado como una herramienta clave para evaluar y cuantificar el impacto ambiental de los sistemas de agua. La aplicación de esta metodología permite identificar de manera precisa las fuentes de emisiones a lo largo de todo el proceso, lo que facilita la elaboración de estrategias de mitigación y la toma de decisiones basadas en datos concretos [10]. La integración de datos reales y la utilización de factores de emisión actualizados, como los publicados por DEFRA, potencian la fiabilidad de los inventarios de GEI en el sector del agua [1].

La transición hacia una economía baja en carbono exige, además, la adopción de energías renovables y la optimización de procesos en todas las etapas del ciclo del agua. La modernización de las EDAR y la incorporación de sistemas de control avanzado no solo reducen la dependencia de

fuentes fósiles, sino que también mejoran la eficiencia operativa y disminuyen la huella de carbono global [2,9].

El impacto ambiental del sector del agua es multidimensional, abarcando desde la extracción y distribución hasta el tratamiento de aguas residuales y la disposición final de lodos. Cada uno de estos procesos contribuye, de forma directa o indirecta, al incremento de GEI en la atmósfera, lo que subraya la importancia de contar con inventarios ambientales precisos y estrategias de optimización [3].

La consolidación de metodologías de medición y reporte de emisiones, conforme a estándares internacionales como ISO 14064 y el GHG Protocol, permite comparar de manera homogénea el desempeño ambiental del sector del agua a nivel global. Esto resulta esencial para identificar mejores prácticas y fomentar la adopción de tecnologías limpias en las infraestructuras hídricas [2,4].

Por otra parte, la creciente urbanización y el aumento de la demanda de recursos hídricos han incrementado la presión sobre las infraestructuras de agua, generando desafíos adicionales en términos de eficiencia y sostenibilidad. La gestión integrada del ciclo del agua se convierte en un factor decisivo para minimizar las emisiones y optimizar el uso de la energía en el sector [5].

La implementación de sistemas inteligentes y de monitoreo continuo en las EDAR permite ajustar en tiempo real los procesos operativos, lo que contribuye a reducir el consumo energético y, por ende, las emisiones indirectas asociadas al tratamiento y distribución del agua [6]. Estos avances tecnológicos son fundamentales para la adaptación de las infraestructuras a las exigencias de un mundo en constante cambio climático.

El desarrollo de políticas ambientales a nivel global, respaldadas por acuerdos internacionales como el Acuerdo de París, ha subrayado la necesidad de reducir las emisiones de GEI en todos los sectores. En este contexto, el sector del agua se ve obligado a revisar y mejorar sus procesos para contribuir de manera significativa a la mitigación del cambio climático, lo que refuerza la relevancia de evaluar y optimizar su huella de carbono [7].

### **3.1.2 Impacto ambiental de infraestructuras y servicios públicos.**

El impacto ambiental de las infraestructuras y servicios públicos, como el tratamiento de aguas residuales, el transporte y la gestión de residuos, representa una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Estos sectores dependen de procesos intensivos en energía, con implicaciones significativas para el cambio climático debido a la liberación de CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Las emisiones asociadas a estos sectores se encuentran mayoritariamente en los Alcances 1 y 2 (emisiones directas e indirectas por consumo de energía) y, en menor medida, en el Alcance 3, derivadas de procesos en la cadena de valor [14].

Las EDAR son un ejemplo paradigmático del impacto ambiental de las infraestructuras hídricas. Durante el tratamiento de aguas residuales, se producen emisiones significativas de GEI debido a los procesos de descomposición biológica, especialmente en etapas de nitrificación y desnitrificación. Estudios como el de Friedrich y Buckley han demostrado que las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), un gas con un potencial de calentamiento global 298 veces superior al del CO<sub>2</sub>, son particularmente preocupantes en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde pueden representar hasta el 80% de las emisiones totales de GEI del proceso [6].

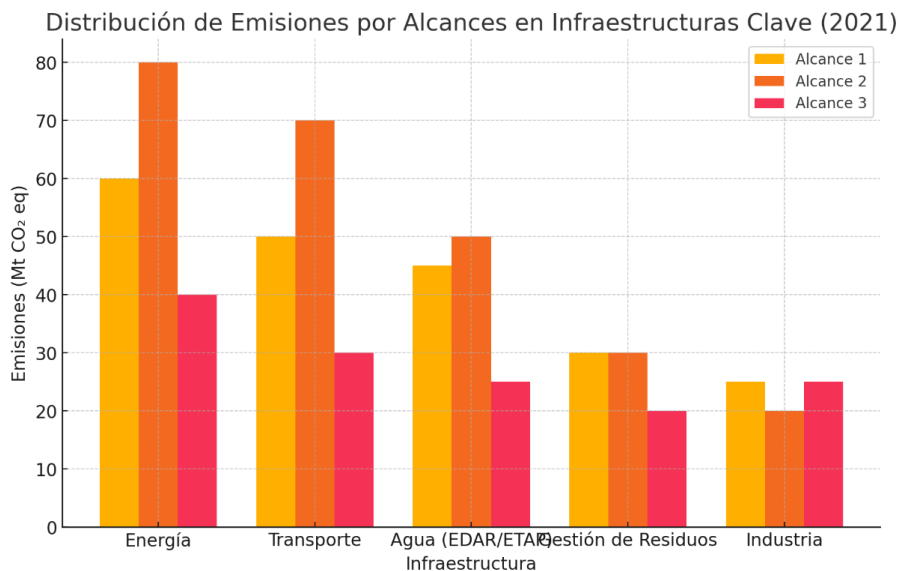
El sector del transporte también genera impactos ambientales considerables, especialmente en entornos urbanos. La dependencia de combustibles fósiles para el transporte de mercancías y personas genera altas emisiones de CO<sub>2</sub>. En España, el transporte representa aproximadamente el 25% de las emisiones totales de GEI, siendo el transporte por carretera el mayor contribuyente [14]. Además, los desplazamientos de empleados (Categoría 7 del Alcance 3) pueden añadir emisiones indirectas significativas en organizaciones con una alta movilidad laboral.

En cuanto a la gestión de residuos, las emisiones provienen principalmente de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos en vertederos, lo que genera importantes cantidades de metano (CH<sub>4</sub>), un gas con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el del CO<sub>2</sub>. Las instalaciones de incineración también generan emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes atmosféricos, mientras que los procesos de valorización energética presentan una alternativa para reducir el impacto ambiental asociado [18].

El sector energético, vinculado indirectamente a estas infraestructuras, también es una fuente clave de emisiones. El consumo de electricidad para mantener operativas las plantas de tratamiento, los sistemas de transporte y las instalaciones de gestión de residuos es responsable de una parte significativa de las emisiones de GEI en el Alcance 2. El uso de energías renovables y la adopción de tecnologías más eficientes pueden reducir significativamente este impacto [19].

El Análisis del Ciclo de Vida (LCA) ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar el impacto ambiental de estas infraestructuras. Al analizar todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, el LCA permite identificar los procesos con mayor contribución a las emisiones de GEI y evaluar alternativas tecnológicas para minimizar dicho impacto. Estudios recientes han destacado que una optimización operativa en EDAR puede reducir las emisiones en un 20-30%, mientras que la adopción de tecnologías más limpias en el transporte y la gestión de residuos puede disminuir las emisiones en un 15-25% [7].

Figura. 7. Distribución de emisiones por Alcances (1, 2 y 3) en infraestructuras clave (2021)



Fuente: Adaptado de MITECO, 2023 [14] y AEAS, 2021 [15].

Un análisis comparativo entre distintos sectores revela que las infraestructuras hídricas, debido a la complejidad de sus procesos biológicos y químicos, presentan mayores desafíos para la reducción de emisiones en comparación con otros sectores. Por ejemplo, mientras que la electrificación del transporte es una solución viable para reducir las emisiones del sector transporte, las emisiones de  $N_2O$  en EDAR siguen siendo difíciles de controlar debido a la variabilidad inherente a los procesos biológicos involucrados [5].

El impacto acumulativo de las emisiones generadas por estos sectores subraya la importancia de adoptar estrategias integrales de mitigación. Esto implica la implementación de tecnologías más limpias, la optimización de procesos operativos y la promoción de políticas que fomenten el uso de energías renovables y la eficiencia energética en infraestructuras clave. La colaboración entre distintos sectores también puede generar sinergias para reducir el impacto ambiental global. Por ejemplo, el aprovechamiento del biogás generado en EDAR para la producción de energía puede contribuir a la reducción del consumo de energía convencional y, por ende, a la disminución de emisiones de GEI [16].

En este contexto, la experiencia de Sacyr en la gestión ambiental de infraestructuras críticas, como las EDAR de Yecla, Raspay y EBAR Las Teresas, es un claro ejemplo de cómo la adopción de tecnologías avanzadas y la optimización de procesos pueden generar reducciones significativas de emisiones. La implementación de medidas de control para minimizar las emisiones de  $N_2O$  y la integración de fuentes renovables en el suministro energético son algunas de las estrategias que han permitido a Sacyr reducir su huella de carbono y mejorar la sostenibilidad operativa de sus instalaciones [17].

Tabla 1. Comparación de emisiones de GEI en infraestructuras clave (2021)

| Sector              | Emisiones Totales (Mt CO <sub>2</sub> eq) | Proporción del Total (%) |
|---------------------|---|--------------------------|
| Energía             | 180                                       | 30%                      |
| Transporte          | 150                                       | 25%                      |
| Agua (EDAR/ETAP)    | 120                                       | 20%                      |
| Gestión de Residuos | 80  | 13%                      |
| Industria           | 70  | 12%                      |

Fuente: Adaptado de MITECO, "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero," 2023 [14].

## 3.2. Conceptualización y definiciones

### 3.2.1 Definición de huella de carbono

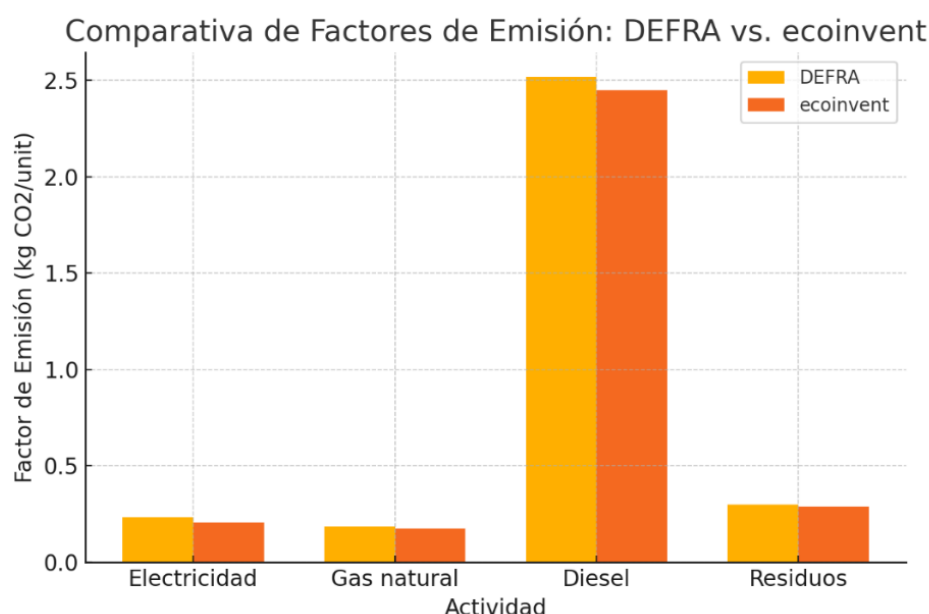
La huella de carbono se define como la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente por una actividad, proceso o entidad, expresada en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (t CO<sub>2</sub> eq). Esta medida abarca desde las emisiones derivadas de la combustión de combustibles fósiles hasta aquellas asociadas al consumo energético indirecto, integrando las diferentes etapas del ciclo de vida. Se calcula mediante metodologías reconocidas como el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), que permiten desglosar las emisiones en distintas fases y asignarles un valor en términos de impacto climático [1]. La cuantificación de la huella de carbono es esencial para identificar los focos de emisiones y diseñar estrategias de mitigación. La metodología empleada establece parámetros claros para el cálculo, asegurando la comparabilidad de resultados y la transparencia en la medición. Este indicador resulta fundamental para la toma de decisiones ambientales a nivel empresarial y regulatorio [1].

La medición de la huella de carbono se basa en la recopilación y análisis de datos de actividad, que se multiplican por factores de emisión específicos para cada fuente. Estos factores, como los



publicados por DEFRA y complementados por ecoinvent, permiten convertir cantidades de energía, materiales y procesos en emisiones de GEI. La conversión de unidades es un aspecto crítico del cálculo, ya que se deben estandarizar las medidas de consumo y producción para garantizar resultados precisos en t CO<sub>2</sub> eq. La integración de datos reales de operación es vital para obtener una estimación representativa del impacto ambiental. La aplicación de estos métodos facilita la identificación de oportunidades de reducción y la comparación entre diferentes escenarios operativos [2]. La exactitud en la recopilación y el uso de factores de emisión actualizados constituyen la base para un inventario ambiental robusto y confiable [2].

Figura. 8. Comparativa de Factores de Emisión: DEFRA vs. ecoinvent



Fuente: Climatiq, "ecoinvent Emission Factors".

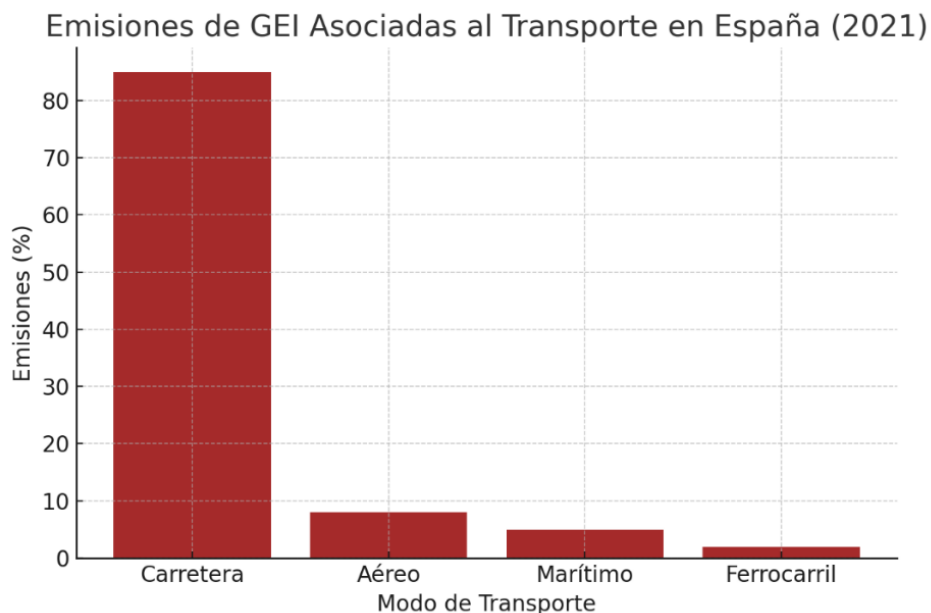
La transformación de los datos de actividad en emisiones se efectúa mediante la multiplicación directa por el factor de emisión correspondiente, lo que permite determinar la contribución de cada fuente a la huella total. Este proceso se aplica a diversas áreas, como la combustión, la generación de electricidad y el tratamiento de materiales. La precisión de este cálculo depende de

la calidad de los datos y de la selección adecuada de los factores, que deben reflejar las condiciones específicas del proceso evaluado. Los resultados obtenidos ofrecen una visión integral del impacto ambiental y facilitan la identificación de áreas con alto potencial de mitigación. La sistematización de este método, conforme a estándares internacionales, refuerza su validez y utilidad en el análisis de GEI [3]. De esta manera, el cálculo se convierte en una herramienta indispensable para la planificación y la mejora en la gestión ambiental.

La estandarización de la medición de la huella de carbono se ha consolidado a través de normativas internacionales como ISO 14064 y el GHG Protocol, que proporcionan lineamientos claros para la cuantificación y el reporte de GEI. Estas directrices aseguran que la metodología utilizada sea replicable y comparable en diferentes contextos, lo que facilita la toma de decisiones a nivel global. La adopción de estos estándares permite que los inventarios ambientales sean reconocidos y verificados, aumentando la credibilidad de los datos. La implementación de un enfoque normativo contribuye a la integración de datos reales y a la reducción de incertidumbres en los cálculos. Asimismo, estas normativas fomentan la transparencia y la rendición de cuentas en la gestión de emisiones, aspectos esenciales para cumplir con las expectativas de stakeholders y reguladores [4]. La armonización de metodologías permite, además, la comparación de resultados entre distintas industrias y regiones.

El análisis de la huella de carbono se erige como una herramienta crucial en la lucha contra el cambio climático, ya que permite cuantificar el impacto de las actividades humanas en el balance térmico de la Tierra. La acumulación de GEI en la atmósfera, originada por procesos industriales, energéticos y de transporte, contribuye al calentamiento global y a fenómenos climáticos extremos. La reducción de estas emisiones es imperativa para limitar el aumento de la temperatura global y evitar consecuencias irreversibles para los ecosistemas y la sociedad. La aplicación de métodos de LCA en la evaluación de la huella de carbono permite identificar áreas de alto impacto y diseñar estrategias de mitigación precisas. Esta capacidad de diagnóstico es esencial para orientar políticas públicas y acciones empresariales en pro de la sostenibilidad [5]. Los datos generados a partir de estos análisis se convierten en indicadores clave para medir el progreso en la reducción de emisiones.

Figura. 9. Emisiones de GEI Asociadas al Transporte en España (2021)



Fuente: MITECO, "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero".

La relevancia de cuantificar la huella de carbono radica en su capacidad para traducir la complejidad de las emisiones en un indicador único, que integra múltiples fuentes y procesos. Este indicador permite evaluar el desempeño ambiental de una entidad y establecer metas de reducción que sean ambiciosas y medibles. La identificación de los principales contribuyentes a la huella total facilita la implementación de medidas correctivas y la optimización de procesos. Además, el seguimiento continuo de la huella de carbono es un requisito fundamental en el contexto de las políticas ambientales internacionales, que exigen transparencia y responsabilidad en la gestión de emisiones. La metodología de cálculo, basada en la integración de datos reales y factores de emisión actualizados, proporciona una base sólida para desarrollar estrategias de mitigación a largo plazo [6]. La medición precisa de la huella de carbono se convierte, por tanto, en un pilar estratégico para la sostenibilidad ambiental.

La huella organizacional, o corporativa, abarca el total de emisiones de GEI emitidas por una entidad en el transcurso de todas sus actividades, incluyendo las emisiones directas (Alcance 1), las derivadas del consumo de energía (Alcance 2) y las emisiones indirectas a lo largo de la cadena de valor (Alcance 3). Este enfoque macro permite a la organización tener una visión global de su impacto ambiental, facilitando la identificación de las áreas críticas que requieren intervención. La medición de la huella organizacional se utiliza para establecer metas corporativas de reducción de emisiones y para comunicar el desempeño ambiental a stakeholders externos e internos. La integración de diversas fuentes de datos, conforme a metodologías estandarizadas, refuerza la transparencia y la comparabilidad de los inventarios, lo que es fundamental en el contexto de la sostenibilidad empresarial [7]. Este enfoque global constituye la base para desarrollar estrategias integrales que aborden tanto aspectos operativos como de cadena de suministro.

Por otro lado, la huella de producto se centra en evaluar el impacto ambiental de un producto específico a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Este análisis detallado, realizado mediante la metodología de LCA, permite desglosar las emisiones en cada fase del ciclo y compararlas con alternativas de diseño o procesos de producción. La huella de producto es particularmente útil para identificar oportunidades de mejora en la eficiencia y la sostenibilidad del producto, permitiendo la optimización en el uso de recursos y la reducción de emisiones en cada etapa. Este enfoque microambiental complementa la huella organizacional, proporcionando una visión detallada que es esencial para el desarrollo de productos con menor impacto ambiental [8]. La comparación entre diferentes productos y tecnologías se vuelve posible gracias a la estandarización de los métodos de cálculo y a la transparencia en el reporte de emisiones.

La diferencia fundamental entre la huella organizacional y la huella de producto radica en su escala y en el alcance del análisis. Mientras que la huella organizacional aborda el impacto total de una entidad, abarcando todas sus actividades y procesos, la huella de producto se limita a medir el impacto ambiental de un producto o servicio específico. Este último enfoque permite una evaluación más granular y detallada de las emisiones, identificando las fases del ciclo de vida en las que se pueden implementar mejoras significativas. La huella organizacional es utilizada

principalmente para establecer estrategias corporativas y para informar sobre el desempeño ambiental global, mientras que la huella de producto se orienta a la optimización del diseño y la mejora de procesos específicos [9]. Ambos enfoques son complementarios y esenciales para una gestión ambiental integral, ya que permiten identificar sinergias entre la operación global y las mejoras puntuales en el desarrollo de productos.

La implementación de la huella organizacional implica la recopilación de datos de todas las fuentes de emisiones de la empresa, lo que permite construir un inventario completo que abarca tanto emisiones directas como indirectas. Este proceso requiere de una coordinación entre las diferentes áreas operativas y de un riguroso seguimiento de los datos, para asegurar la precisión y la coherencia en el reporte. La utilización de metodologías estandarizadas, como el GHG Protocol, garantiza que los resultados sean comparables a nivel internacional y que se puedan establecer metas de reducción ambiciosas y alcanzables. La integración de la huella organizacional en la estrategia empresarial permite a la empresa identificar áreas de mejora y priorizar inversiones en tecnologías limpias y prácticas sostenibles [10]. Esta visión global es esencial para abordar el desafío del cambio climático desde una perspectiva holística y coordinada.

Por su parte, la huella de producto se enfoca en la evaluación de cada fase del ciclo de vida de un producto, permitiendo un análisis detallado de las emisiones asociadas a la producción, distribución, uso y disposición final. Este enfoque facilita la identificación de las etapas con mayor impacto ambiental y la comparación entre distintas alternativas de diseño o tecnología. La aplicación de la huella de producto es especialmente relevante en industrias donde la innovación y la optimización de procesos son cruciales para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental. La metodología basada en LCA proporciona una herramienta potente para desglosar las emisiones y detectar oportunidades de mejora en cada fase, lo que permite a las empresas desarrollar productos más sostenibles y competitivos [11]. La comparación entre la huella de producto y la huella organizacional ofrece una perspectiva completa que integra tanto el impacto global de la empresa como las mejoras específicas en el desarrollo de sus productos.

La principal diferencia entre ambos enfoques radica en su utilidad para la toma de decisiones estratégicas. La huella organizacional sirve para evaluar el desempeño ambiental global de la empresa y para establecer políticas corporativas de sostenibilidad, mientras que la huella de producto se utiliza para optimizar el ciclo de vida de un producto concreto y para fomentar la innovación en su diseño. Este contraste metodológico permite a las organizaciones implementar estrategias de reducción de emisiones que sean coherentes a nivel macro y que, a la vez, impulsen mejoras puntuales en el proceso productivo. La integración de ambas perspectivas es fundamental para lograr una gestión ambiental completa, ya que permite identificar sinergias y compensaciones entre el impacto global de la empresa y las optimizaciones en el desarrollo de sus productos [12]. La adopción de un enfoque dual refuerza la capacidad de la organización para enfrentar los desafíos del cambio climático de forma integral y para cumplir con los estándares internacionales de sostenibilidad.

La medición de emisiones en sectores de infraestructuras y servicios públicos es fundamental para comprender el impacto ambiental global y diseñar estrategias efectivas de mitigación. La cuantificación precisa de los gases de efecto invernadero (GEI) permite identificar las fuentes de emisión en cada etapa de la cadena de valor, desde la captación y distribución de agua hasta el transporte de personas y mercancías. Este enfoque resulta esencial para infraestructuras críticas, ya que el sector del agua, por ejemplo, involucra operaciones intensivas en consumo energético y procesos biológicos que pueden generar emisiones significativas. La implementación de metodologías basadas en el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) ha permitido desarrollar inventarios de ciclo de vida que son comparables y robustos, sentando las bases para la formulación de políticas ambientales [1]. Además, la medición de emisiones es crucial para evaluar el rendimiento ambiental y establecer metas de reducción que sean medibles y alcanzables.

La evaluación de las emisiones en servicios públicos, como el suministro y tratamiento del agua, no solo contribuye a mitigar el cambio climático, sino que también mejora la eficiencia operativa de las infraestructuras. En plantas de tratamiento de aguas residuales, la identificación de focos críticos de emisiones, tanto directas como indirectas, es vital para optimizar procesos y reducir el consumo energético. La recopilación de datos operativos, combinada con factores de emisión

actualizados, permite desarrollar inventarios precisos que facilitan la toma de decisiones estratégicas. Este enfoque integral se ha consolidado en estudios que destacan la relevancia de aplicar LCA en infraestructuras del sector agua, permitiendo evaluar alternativas tecnológicas y operativas [2]. Asimismo, la transparencia en el reporte de GEI mejora la rendición de cuentas y la confianza de los stakeholders.

En el ámbito del transporte, la medición de emisiones resulta igualmente esencial, dado que este sector es una fuente considerable de GEI a nivel mundial. El análisis de datos de movilidad, distancias recorridas y consumo de combustibles permite estimar de forma precisa el impacto ambiental de los desplazamientos de personas y bienes. La aplicación de metodologías estandarizadas, como las publicadas por DEFRA, facilita la conversión de datos en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que es clave para el desarrollo de políticas de transporte sostenible. Además, la optimización de rutas y la promoción de medios de transporte menos contaminantes son estrategias que surgen de la adecuada cuantificación de emisiones [3]. La integración de estos datos en inventarios ambientales permite a las ciudades y empresas establecer medidas correctivas y mejorar la calidad del aire.

La recopilación sistemática de datos es un paso crítico para la medición de emisiones en infraestructuras, ya que garantiza la fiabilidad de los resultados y la identificación de áreas de mejora. En sectores como el agua y el transporte, la variabilidad de los datos operativos y la diversidad de fuentes de emisiones requieren métodos de recolección rigurosos y estandarizados. La implementación de sensores, sistemas de monitoreo y la digitalización de registros operativos ha permitido mejorar la calidad de la información y, por ende, la precisión en el cálculo de la huella de carbono. Estudios han demostrado que la combinación de fuentes de datos primarias y secundarias es esencial para reducir la incertidumbre en las estimaciones y para proporcionar una base sólida en la toma de decisiones [4]. Este proceso contribuye a una mejor gestión ambiental y a la formulación de estrategias de reducción de emisiones a nivel regional y nacional.

La integración de herramientas de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) en la medición de emisiones en infraestructuras permite desglosar el impacto ambiental en etapas específicas del ciclo de vida de

un servicio. En el sector del agua, por ejemplo, se pueden analizar las emisiones derivadas de la captación, tratamiento y distribución, mientras que en el transporte se evalúan las emisiones a lo largo de la cadena logística. Este enfoque segmentado facilita la identificación de oportunidades de mejora en cada fase y la comparación entre diferentes alternativas tecnológicas. La aplicación de LCA ha sido clave en estudios que han comparado la huella de carbono de distintos sistemas de tratamiento y transporte, demostrando la efectividad de estas herramientas para orientar políticas de sostenibilidad [5]. La capacidad para desagregar las emisiones permite a los responsables políticos y a las empresas establecer objetivos de reducción específicos y medibles.

En infraestructuras y servicios públicos, la adopción de normativas internacionales como la ISO 14064 y el GHG Protocol es fundamental para garantizar la consistencia y comparabilidad de los inventarios de emisiones. Estos estándares proporcionan un marco estructurado para la cuantificación y reporte de GEI, asegurando que las metodologías aplicadas sean robustas y verificables. La utilización de factores de emisión provenientes de fuentes reconocidas, como DEFRA y ecoinvent, respalda la fiabilidad de los cálculos y facilita la integración de datos operativos en un inventario global. La adherencia a estos marcos normativos es esencial para que las infraestructuras puedan demostrar su compromiso con la reducción de emisiones y la sostenibilidad ambiental [6]. Esta estandarización es clave para fomentar la transparencia y la rendición de cuentas en el sector público y privado.

La medición de emisiones en el sector del agua y del transporte tiene un impacto directo en la formulación de políticas públicas y en la implementación de estrategias de sostenibilidad. Los gobiernos y organismos internacionales dependen de inventarios ambientales precisos para establecer metas de reducción de GEI y para monitorear el progreso en la lucha contra el cambio climático. La cuantificación de la huella de carbono en infraestructuras permite identificar los sectores y procesos que requieren intervención urgente, lo que a su vez orienta la asignación de recursos y la inversión en tecnologías limpias. Las políticas ambientales basadas en datos confiables promueven la adopción de medidas innovadoras y la optimización de procesos operativos, contribuyendo a una mayor eficiencia y a la reducción de impactos ambientales [7].



Este tipo de análisis se ha convertido en un elemento central para la agenda climática global y para la formulación de estrategias de mitigación a nivel local y nacional.

La importancia de la medición de emisiones en servicios públicos se extiende también al ámbito económico, ya que la eficiencia en la gestión de recursos y la reducción de GEI pueden traducirse en significativos ahorros operativos. En el sector del agua, la optimización del consumo energético en las plantas de tratamiento y la mejora en la gestión de lodos son factores que influyen directamente en los costos operativos y en la competitividad de las empresas. La identificación de fuentes de ineficiencia mediante inventarios ambientales permite implementar medidas correctivas que reduzcan tanto las emisiones como los costos asociados. Esta relación entre eficiencia energética y sostenibilidad ambiental ha sido destacada en numerosos estudios, que muestran cómo la inversión en tecnologías limpias puede generar retornos económicos a largo plazo [8]. La medición precisa de las emisiones es, por lo tanto, una herramienta clave para la gestión estratégica de recursos en infraestructuras críticas.

El sector del transporte, al ser una de las principales fuentes de emisiones de GEI, requiere de un análisis detallado que permita identificar áreas de mejora y optimizar las rutas y modos de transporte utilizados. La cuantificación de emisiones en este sector se realiza a partir de datos de movilidad, consumo de combustibles y distancias recorridas, y se traduce en indicadores que permiten evaluar la eficiencia y el impacto ambiental de los desplazamientos. La aplicación de factores de emisión estandarizados facilita la conversión de estos datos en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que es esencial para el diseño de políticas de transporte sostenible. La evaluación de la huella de carbono en el transporte no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también mejora la calidad del aire y reduce los riesgos para la salud pública [9]. Este enfoque integral es fundamental para promover un transporte más limpio y eficiente, en línea con los objetivos de sostenibilidad global.

La incorporación de tecnologías de monitoreo y sistemas de gestión avanzada ha revolucionado la forma en que se recopilan y analizan los datos de emisiones en infraestructuras. En el sector del agua, por ejemplo, la utilización de sensores y sistemas de control en tiempo real permite un

seguimiento continuo del consumo energético y de las emisiones generadas durante el tratamiento. Esta digitalización facilita la obtención de datos precisos y actualizados, lo que a su vez mejora la exactitud de los inventarios ambientales. La integración de estas tecnologías en infraestructuras críticas se ha convertido en una práctica recomendada para la gestión ambiental, permitiendo ajustes inmediatos en los procesos operativos y la optimización de recursos [10]. La capacidad para monitorizar en tiempo real el desempeño ambiental es esencial para alcanzar metas de reducción de emisiones y para implementar estrategias de mejora continua.

La estandarización en la medición de emisiones ha permitido la comparación de resultados entre diferentes infraestructuras y regiones, lo que es crucial para el desarrollo de políticas ambientales coherentes. La utilización de marcos normativos internacionales y de factores de emisión reconocidos ha generado inventarios ambientales que son comparables a nivel global, facilitando la identificación de mejores prácticas y la adopción de tecnologías de reducción de GEI. Este enfoque comparativo es particularmente relevante en sectores como el agua y el transporte, donde la diversidad de tecnologías y procesos operativos puede generar diferencias significativas en la huella de carbono. La posibilidad de establecer benchmarks y objetivos de reducción basados en datos comparables fortalece la capacidad de las organizaciones para planificar e implementar medidas de mitigación efectivas [11]. La estandarización es, por tanto, un componente clave para la gestión ambiental y para la rendición de cuentas en el contexto del cambio climático.

La aplicación de la medición de emisiones en sectores de infraestructuras y servicios públicos también tiene una dimensión social y de salud pública. La reducción de GEI y la mejora en la eficiencia operativa no solo contribuyen a mitigar el calentamiento global, sino que también reducen la contaminación del aire y el agua, lo que tiene un impacto directo en la calidad de vida de las personas. La adopción de tecnologías limpias y de prácticas de gestión sostenible mejora la resiliencia de las ciudades frente a eventos climáticos extremos y reduce la incidencia de enfermedades relacionadas con la contaminación. Este aspecto es especialmente importante en entornos urbanos, donde la concentración de infraestructuras y servicios públicos puede amplificar el impacto de las emisiones. La medición precisa de las emisiones, combinada con estrategias de reducción, se convierte en un elemento esencial para proteger la salud de la población y promover

el desarrollo sostenible [12]. La integración de estos enfoques ambientales y sociales es crucial para lograr un futuro más equilibrado y resiliente frente a los desafíos del cambio climático.

La medición de emisiones en sectores críticos, como el agua y el transporte, se configura como una herramienta estratégica para la toma de decisiones a nivel gubernamental y empresarial. La recopilación y análisis de datos de emisiones permite identificar los principales impulsores del impacto ambiental y priorizar las intervenciones más efectivas. Este tipo de análisis es fundamental para el diseño de políticas públicas que fomenten la transición hacia una economía baja en carbono, y para la elaboración de planes de acción que integren objetivos de reducción de GEI en la planificación urbana y en la gestión de infraestructuras. La aplicación de métodos estandarizados y la transparencia en la comunicación de los resultados fortalecen la confianza de los stakeholders y facilitan la adopción de medidas correctivas. Además, la medición de emisiones se convierte en un indicador clave para evaluar el progreso en la implementación de políticas climáticas y para ajustar las estrategias en función de los resultados obtenidos [13]. La relevancia de esta práctica se evidencia en la creciente demanda de transparencia y rendición de cuentas en materia ambiental a nivel global.

Cada uno de estos aspectos subraya la importancia de la medición de emisiones en infraestructuras y servicios públicos, no solo como una herramienta de gestión ambiental, sino también como un motor para el desarrollo de políticas sostenibles. La integración de datos precisos y actualizados, junto con la aplicación de metodologías estandarizadas, permite que los sectores del agua y del transporte puedan optimizar sus procesos y reducir significativamente su huella de carbono. La consolidación de inventarios ambientales robustos es esencial para la toma de decisiones estratégicas, lo que a su vez contribuye a la competitividad y a la innovación en estos sectores. Los beneficios de la medición de emisiones se extienden a múltiples ámbitos, desde la reducción de costos operativos hasta la mejora en la salud pública y la protección del medio ambiente [1,2]. La adopción de estos enfoques es indispensable para enfrentar los retos del cambio climático de forma integral y para promover una gestión sostenible y resiliente en las infraestructuras críticas.

La medición de emisiones es, en última instancia, una herramienta indispensable para la planificación a largo plazo y para la mejora continua en sectores de gran relevancia social y económica, como el agua y el transporte. Al proporcionar datos cuantitativos sobre el impacto ambiental de cada proceso, esta práctica permite establecer objetivos claros y medibles de reducción de GEI. La integración de estos inventarios en la estrategia empresarial y en la formulación de políticas públicas fomenta la innovación y la inversión en tecnologías limpias, lo que resulta fundamental para la transición hacia una economía sostenible. La transparencia y la comparabilidad de los datos obtenidos a través de metodologías estandarizadas fortalecen la confianza de los inversores y de la sociedad, facilitando la implementación de medidas correctivas y la adopción de prácticas operativas más eficientes [3,4]. Este enfoque integral es crucial para garantizar que los sectores de infraestructuras y servicios públicos contribuyan de manera significativa a la mitigación del cambio climático y a la protección del medio ambiente.

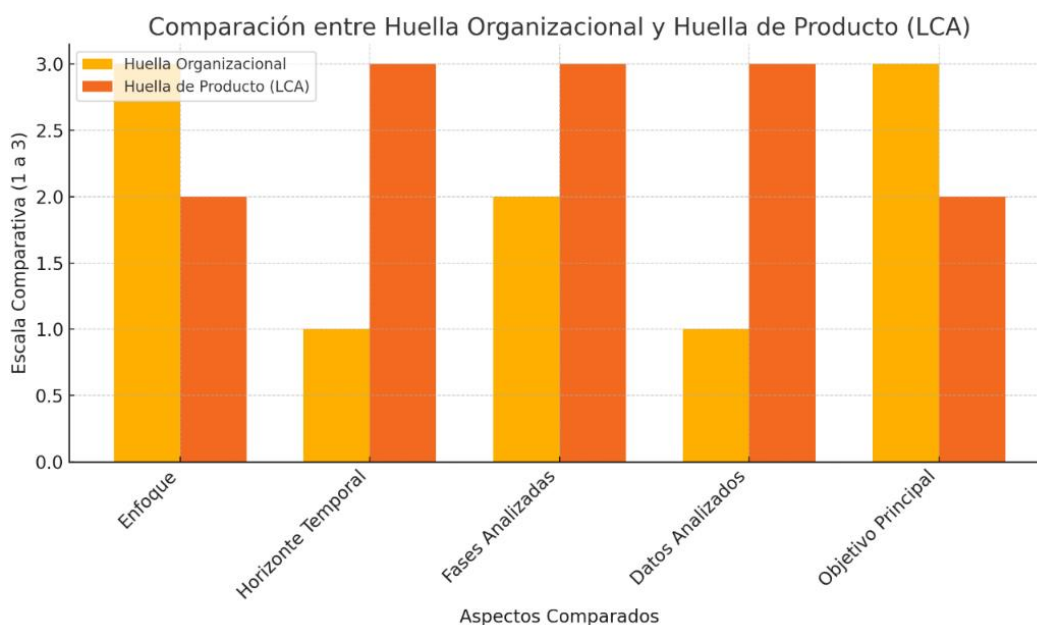
### **3.2.2 Diferenciación entre huella organizacional y de producto (LCA).**

La huella de carbono organizacional y la huella de carbono de producto (LCA) son dos enfoques complementarios para evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La huella de carbono organizacional evalúa las emisiones derivadas de todas las operaciones de una organización durante un período determinado, incluyendo actividades directas e indirectas. Por otro lado, la huella de carbono de producto se centra en las emisiones generadas durante el ciclo de vida completo de un producto o servicio, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final o reciclaje. Esta distinción es clave para adoptar estrategias de mitigación específicas y desarrollar planes de reducción de emisiones adaptados a cada contexto [1], [2].

El cálculo de la huella organizacional está basado en estándares como ISO 14064-1 y el GHG Protocol, que definen la contabilidad de GEI en términos de Alcance 1 (emisiones directas), Alcance 2 (emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad) y Alcance 3 (otras emisiones indirectas generadas en la cadena de valor) [14]. Este enfoque permite a las organizaciones cuantificar sus emisiones y adoptar políticas para reducir su impacto ambiental. La huella de

carbono organizacional suele utilizarse en el ámbito corporativo para cumplir con regulaciones ambientales o para participar en programas voluntarios de reducción de emisiones, como el Registro de Huella de Carbono en España gestionado por la OECC [14].

Figura. 10. Comparación entre Huella Organizacional y Huella de Producto (LCA)



Fuente: Elaboración propia basada en ISO 14064-1 y ISO 14040/44 [14], [10].

Por otro lado, la huella de carbono de producto, calculada mediante el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), evalúa las emisiones a lo largo de todas las etapas de producción, uso y disposición final del producto. Esta metodología sigue los principios establecidos en ISO 14040/44, que abordan los impactos ambientales en todo el ciclo de vida. A diferencia de la huella organizacional, el enfoque LCA permite identificar puntos críticos específicos en la cadena de suministro o en los procesos productivos donde se pueden implementar mejoras para reducir las emisiones de GEI [10], [11].

La LCA se ha aplicado ampliamente en el sector del agua para evaluar el impacto ambiental de infraestructuras como las EDAR y las ETAP, donde se han identificado emisiones significativas en las

fases de tratamiento y disposición de lodos, así como en el consumo de energía [5]. Estudios como el de Pasqualino et al. han demostrado que el análisis de ciclo de vida en plantas de tratamiento permite comparar diferentes tecnologías de tratamiento terciario para seleccionar las alternativas más sostenibles y reducir las emisiones asociadas [10].

Un aspecto clave para diferenciar ambas metodologías es el nivel de agregación de datos. La huella organizacional tiende a utilizar datos agregados que reflejan el comportamiento global de una entidad durante un año, mientras que el LCA desagrega las emisiones en fases específicas del ciclo de vida del producto, lo que permite un análisis más granular y detallado [2]. Esta diferenciación es especialmente importante en sectores como el tratamiento de aguas residuales, donde el impacto ambiental puede variar considerablemente según el tipo de proceso utilizado y las condiciones operativas específicas de cada planta [7].

Otro elemento diferenciador es el horizonte temporal. La huella organizacional evalúa el impacto ambiental a corto plazo, con mediciones anuales o periódicas, mientras que el LCA considera un horizonte más amplio, que abarca desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto. Esta perspectiva temporal más amplia del LCA es útil para evaluar el impacto ambiental acumulativo a lo largo del tiempo y para identificar oportunidades de mejora en todo el ciclo de vida del sistema [6], [8].

En términos de objetivos y aplicaciones, la huella organizacional es utilizada principalmente para establecer políticas corporativas de reducción de emisiones, elaborar informes de sostenibilidad o cumplir con requisitos normativos. Por su parte, la huella de producto basada en LCA se enfoca en optimizar procesos productivos, evaluar alternativas tecnológicas y guiar la toma de decisiones para minimizar el impacto ambiental de productos específicos. Esta diferenciación permite a las organizaciones adoptar enfoques complementarios que aborden tanto la reducción de emisiones globales como la mejora de procesos específicos [3].

La complementariedad entre ambos enfoques es clave para desarrollar estrategias de mitigación más efectivas. Por ejemplo, al analizar la huella de carbono organizacional de una EDAR gestionada por Sacyr, se puede identificar que una parte significativa de las emisiones proviene de procesos

específicos evaluados mediante LCA, lo que permite diseñar acciones focalizadas para reducir dichas emisiones [17]. Esta integración de metodologías refuerza la capacidad de las organizaciones para alcanzar sus objetivos de sostenibilidad y avanzar hacia la neutralidad climática en sus operaciones y productos [16].

### **3.2.3 Importancia de la medición en sectores como el agua y el transporte**

La medición de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es una herramienta esencial para identificar, cuantificar y mitigar el impacto ambiental de los sectores clave como el agua y el transporte. Ambos sectores tienen una contribución significativa a las emisiones globales y, por tanto, requieren de metodologías robustas para evaluar y reducir su huella de carbono. En el sector del agua, las EDAR y ETAP generan emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O derivadas del consumo energético, los procesos biológicos y la gestión de lodos [5]. El transporte, por otro lado, es responsable de una gran proporción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a la dependencia de combustibles fósiles, siendo el sector con mayor impacto en términos de emisiones de Alcance 1 [14].

El análisis de ciclo de vida (LCA) es una metodología ampliamente utilizada para evaluar el impacto ambiental de estos sectores. En el caso del tratamiento de aguas residuales, el LCA permite identificar las etapas del proceso con mayor contribución a las emisiones, incluyendo la aireación, la descomposición anaeróbica de lodos y el consumo de electricidad para el bombeo y tratamiento [10]. Un estudio de Pasqualino et al. comparó diferentes tecnologías de tratamiento terciario, demostrando que la optimización de procesos puede reducir significativamente las emisiones asociadas al tratamiento de aguas residuales [10].

En el sector del transporte, la medición de emisiones se centra principalmente en el Alcance 1 (emisiones directas por combustión de combustibles) y el Alcance 3 (emisiones indirectas derivadas de la producción de combustibles y la cadena de suministro). La implementación de sistemas de movilidad sostenible, como la electrificación del transporte público y el fomento del uso de energías renovables, puede reducir considerablemente las emisiones del sector [15]. Los

datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de MITECO indican que el transporte representa aproximadamente el 25% de las emisiones totales de GEI en España [14].

La monitorización en tiempo real es una herramienta clave para mejorar la precisión de los inventarios de GEI. Retema destaca que el uso de sistemas avanzados de gestión y análisis de datos permite reducir las incertidumbres asociadas a la estimación de emisiones en infraestructuras críticas como las EDAR y los sistemas de transporte [16]. Esta monitorización continua permite identificar anomalías y ajustar las operaciones para minimizar el impacto ambiental.

Además, la valoración de emisiones en Alcance 3 es especialmente relevante en el caso del transporte y la cadena de suministro en el sector del agua. Los desplazamientos de empleados, la logística de insumos y la gestión de residuos pueden generar una cantidad significativa de emisiones indirectas que deben ser contabilizadas para obtener un panorama completo del impacto ambiental [19]. Un estudio realizado por Climatiq destaca que el uso de factores de emisión precisos, como los proporcionados por ecoinvent, permite mejorar la precisión de los inventarios de Alcance 3 y diseñar estrategias más efectivas para reducir estas emisiones [19].

En el sector del agua, el consumo energético es una de las principales fuentes de emisiones de GEI, especialmente en procesos intensivos como la aireación prolongada y la digestión anaeróbica. La Encuesta Nacional de AEAS mostró que, en 2021, el consumo energético de las EDAR en España representó el 20% de las emisiones totales del sector agua [15]. Este dato subraya la necesidad de adoptar tecnologías más eficientes y optimizar los procesos de tratamiento para reducir el impacto ambiental asociado.

El transporte urbano es otro sector donde la medición de emisiones ha resultado clave para diseñar políticas de movilidad sostenible. Estudios de la Generalitat Valenciana han demostrado que la adopción de vehículos eléctricos y la optimización del transporte público pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 20-25% en zonas urbanas [18]. Esta reducción es esencial para cumplir con los compromisos climáticos establecidos en el Acuerdo de París y avanzar hacia la neutralidad climática.



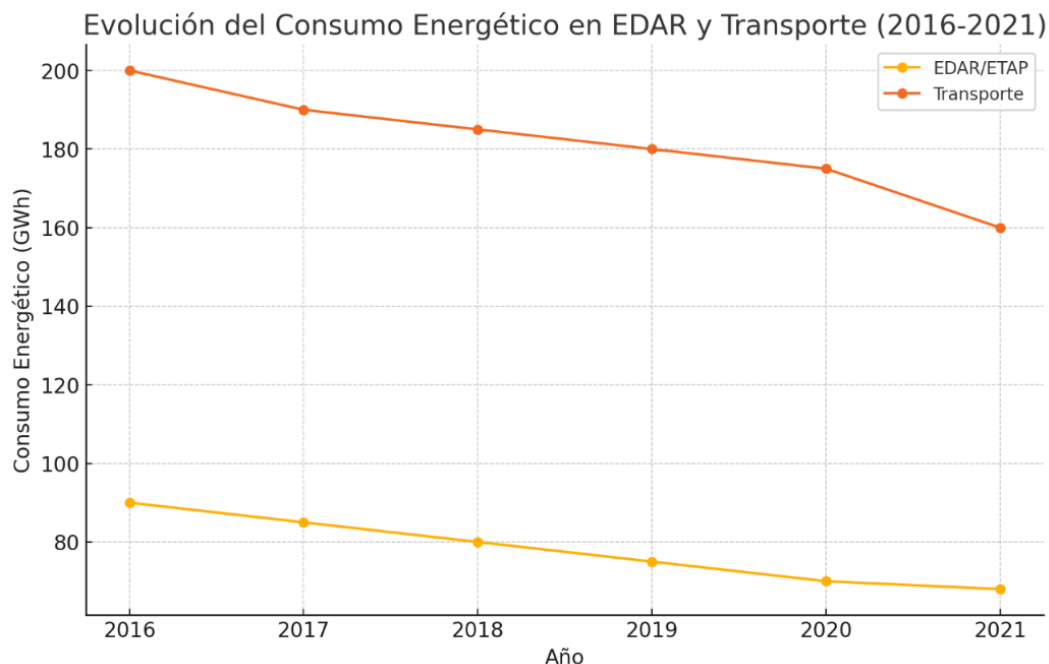
En este sentido, la experiencia de Sacyr en la gestión de infraestructuras críticas como EDAR y sistemas de transporte refleja la importancia de adoptar una estrategia integrada para la medición y mitigación de emisiones. La implementación de sistemas de control y optimización operativa ha permitido a Sacyr reducir su huella de carbono y mejorar la eficiencia energética de sus operaciones [17]. Esta experiencia destaca la relevancia de combinar la medición precisa de emisiones con la adopción de tecnologías innovadoras para lograr un impacto ambiental positivo en sectores clave.

Tabla 2. Comparación de Emisiones por Alcance en EDAR y Transporte (2021)

| Sector     | Alcance 1 (Mt CO <sub>2</sub> eq) | Alcance 2 (Mt CO <sub>2</sub> eq) | Alcance 3 (Mt CO <sub>2</sub> eq) |
|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| EDAR/ETAP  | 45                                | 50                                | 25                                |
| Transporte | 120                               | 20                                | 30                                |

Fuente: Adaptado de MITECO, 2023 [14] y AEAS, 2021 [15].

Figura. 11. Evolución del Consumo Energético en EDAR y Transporte (2016-2021)



Fuente: Adaptado de MITECO, 2023 [14] y AEAS, 2021 [15].

### 3.3. Marco normativo y metodologías de referencia

#### 3.3.1 Normativa y estándares internacionales

ISO 14064-1 es un estándar internacional fundamental que establece los lineamientos para la cuantificación y reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel organizacional. Este documento define de manera precisa los conceptos básicos, el alcance y los requisitos para la elaboración de inventarios de GEI, ofreciendo un marco metodológico que garantiza la consistencia y comparabilidad de los datos reportados [1]. La norma es aplicable a organizaciones de cualquier tamaño y sector, permitiendo una evaluación integral de las emisiones directas e indirectas.

El concepto central de ISO 14064-1 radica en la medición y verificación de las emisiones de GEI, permitiendo a las organizaciones identificar sus fuentes de emisión y establecer estrategias para su mitigación. La norma establece que el inventario debe incluir las emisiones directas (provenientes

de fuentes controladas por la organización) y, opcionalmente, las emisiones indirectas asociadas al consumo de energía y a otras actividades de la cadena de valor [1]. Este enfoque sistemático es esencial para que las organizaciones puedan evaluar su impacto ambiental de forma rigurosa.

En términos de alcance, ISO 14064-1 abarca las emisiones identificables en tres categorías: Alcance 1, que corresponde a las emisiones directas; Alcance 2, que se refiere a las emisiones indirectas por consumo de energía; y Alcance 3, que incluye todas las demás emisiones indirectas derivadas de la cadena de valor. La norma enfatiza que, aunque la recolección de datos para Alcance 3 es opcional, su inclusión aporta una visión más completa y precisa del impacto ambiental de la organización [2]. Este enfoque permite que las empresas determinen con mayor exactitud las áreas donde implementar mejoras.

Los requisitos para la elaboración de inventarios de GEI según ISO 14064-1 se centran en la necesidad de identificar, cuantificar y reportar todas las emisiones relevantes de forma transparente y verificable. La norma exige la definición de límites organizacionales claros, la utilización de metodologías consistentes y la documentación de los supuestos, datos y cálculos utilizados. Esta sistematización es crucial para asegurar que los inventarios sean reproducibles y que se puedan comparar a lo largo del tiempo o entre diferentes organizaciones [2].

Un aspecto esencial del estándar es la necesidad de establecer una contabilidad detallada y transparente, en la que se definan claramente las fronteras de la organización y se clasifiquen las emisiones según su origen. Esto implica que se deben documentar las fuentes de datos, los métodos de cálculo y los factores de emisión utilizados, lo cual permite la verificación externa de los resultados. La transparencia en este proceso fortalece la credibilidad de la organización ante stakeholders y organismos reguladores [3].

ISO 14064-1 también hace hincapié en la importancia de la verificación de los inventarios de GEI. La norma establece que, si bien la verificación externa es opcional, su realización mejora la confiabilidad del inventario y facilita la toma de decisiones basadas en datos sólidos. Este proceso de verificación ya sea interna o a través de terceros, contribuye a identificar áreas de mejora y a asegurar que la información reportada refleje fielmente la realidad operativa [3].

La aplicación de ISO 14064-1 se integra de manera coherente con otras metodologías de análisis ambiental, como el Análisis del Ciclo de Vida (LCA). Mientras que ISO 14064-1 se centra en la cuantificación de GEI a nivel organizacional, el LCA permite evaluar el impacto ambiental de productos o servicios a lo largo de su ciclo de vida. Esta complementariedad ofrece una visión holística del impacto ambiental, que es crucial para la formulación de estrategias de reducción de emisiones [4].

En la práctica, la implementación de este estándar requiere que las organizaciones establezcan procedimientos para la recopilación y gestión de datos operativos, así como la capacitación del personal en la aplicación de metodologías de medición de GEI. La utilización de herramientas informáticas y sistemas de monitoreo se vuelve indispensable para automatizar el proceso y reducir la posibilidad de errores. La integración de estos sistemas contribuye a una mayor eficiencia en la elaboración del inventario ambiental y a una mejor gestión de la sostenibilidad [4].

La adopción de ISO 14064-1 tiene un impacto significativo en la forma en que las organizaciones gestionan sus emisiones, ya que impulsa la identificación de los principales focos de emisión y orienta la adopción de medidas de mitigación. Esta norma se convierte en un instrumento estratégico para la toma de decisiones, permitiendo a las empresas establecer objetivos claros de reducción de GEI y evaluar su progreso en el tiempo. La aplicación rigurosa de este estándar es un paso esencial para avanzar hacia una economía baja en carbono y para responder a las exigencias de sostenibilidad del mercado global [5].

El marco normativo que establece ISO 14064-1 no solo aporta consistencia en la medición, sino que también facilita la comunicación de resultados a nivel internacional. Las organizaciones que adoptan este estándar pueden comparar sus inventarios con los de otras entidades, lo que permite identificar mejores prácticas y fomentar la competencia en términos de eficiencia ambiental. Este intercambio de información es clave para la mejora continua en la gestión de emisiones y para la promoción de políticas ambientales coherentes a nivel global [5].

La norma también destaca la importancia de la flexibilidad en la aplicación de la metodología, permitiendo a las organizaciones adaptar el proceso de medición a sus condiciones operativas

específicas. Esta adaptabilidad es especialmente relevante en sectores con alta complejidad, como el de las infraestructuras y servicios públicos, donde la diversidad de fuentes de emisión requiere enfoques personalizados. La posibilidad de ajustar los parámetros y de incorporar nuevos datos a medida que se dispone de información actualizada es una de las fortalezas de ISO 14064-1 [6].

El cumplimiento de ISO 14064-1 contribuye significativamente a la transparencia en la gestión ambiental, lo que resulta fundamental para la rendición de cuentas ante inversores, clientes y organismos reguladores. La presentación de inventarios de GEI verificados permite a las organizaciones demostrar su compromiso con la sostenibilidad y mejorar su reputación en el mercado. Además, la estandarización de los métodos de cálculo facilita la integración de esta información en reportes corporativos y en estrategias de comunicación ambiental [6].

La integración de ISO 14064-1 con otros marcos normativos, como el GHG Protocol, amplía el alcance del análisis ambiental y refuerza la capacidad de las organizaciones para gestionar sus emisiones de manera integral. La complementariedad entre estos estándares permite que se cubran tanto las emisiones directas como las indirectas, ofreciendo un panorama completo que es esencial para la formulación de estrategias de mitigación efectivas. Esta sinergia metodológica es clave para abordar los retos del cambio climático desde una perspectiva holística y coordinada [7].

El GHG Protocol constituye el marco de referencia más utilizado a nivel mundial para la contabilización y reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y se divide en distintos estándares que abordan tanto el nivel corporativo como el de la cadena de valor. Dentro de este marco, el Corporate Accounting and Reporting Standard se centra en la cuantificación de emisiones que la propia organización controla directamente, mientras que el Corporate Value Chain (Scope 3) Standard amplía el análisis a todas aquellas emisiones indirectas que se generan a lo largo de la cadena de valor. En este contexto, se establecen definiciones precisas para lo que se conoce como Alcance 1, Alcance 2 y Alcance 3, cada uno con características y métodos de cálculo específicos, permitiendo a las empresas tener una visión holística de su huella de carbono [1].

El Alcance 1 comprende todas las emisiones directas de GEI que se originan en fuentes que son propiedad o que están controladas por la organización. Esto incluye la combustión en calderas,

vehículos y cualquier otro proceso industrial donde se utilicen combustibles fósiles. Por ejemplo, las emisiones generadas por la combustión de gas natural en una planta de tratamiento de aguas residuales se consideran de Alcance 1. La importancia de este alcance radica en que estas emisiones son las más fáciles de medir y gestionar, ya que se derivan directamente de las operaciones internas de la empresa. La definición de Alcance 1 es fundamental para que la organización pueda identificar y gestionar de manera efectiva sus fuentes directas de GEI, estableciendo así la base para cualquier estrategia de mitigación [1].

Profundizando en el Alcance 1, las emisiones directas incluyen aquellas que se liberan desde instalaciones, equipos y vehículos que son operados y mantenidos por la organización. Este nivel de emisión se mide a través de datos de consumo energético, uso de combustibles y otros insumos directos, y se reporta en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (t CO<sub>2</sub> eq). La precisión en la medición depende de la disponibilidad y la calidad de los registros operativos, lo que permite a la empresa implementar sistemas de control y seguimiento interno. La transparencia en el reporte de las emisiones de Alcance 1 es esencial para la rendición de cuentas y para el establecimiento de metas de reducción concretas. La estandarización de la medición y el reporte de estas emisiones facilita, además, la comparación entre diferentes empresas y sectores, impulsando la competitividad en términos de sostenibilidad [1].

El Alcance 2 abarca las emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad, calor o vapor que la organización compra para su funcionamiento. A diferencia del Alcance 1, estas emisiones no se generan directamente dentro de las instalaciones de la empresa, sino que provienen de la generación de la energía que se adquiere de fuentes externas. Por ello, para calcular el Alcance 2 es necesario conocer el consumo energético de la organización y aplicar factores de emisión específicos que varían según la fuente de energía y la región. Estos factores permiten transformar el consumo de electricidad en emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta la mezcla energética y las pérdidas en la transmisión y distribución. La inclusión del Alcance 2 es crucial, ya que en muchos casos constituye una parte significativa de la huella de carbono global de la empresa, especialmente en industrias con alto consumo energético [2].

El cálculo del Alcance 2 se basa en la relación entre el consumo de energía y los factores de emisión, los cuales reflejan la intensidad de carbono de la fuente de energía adquirida. La correcta aplicación de estos factores es esencial para obtener una estimación precisa, ya que la huella de carbono resultante depende en gran medida de la calidad de los datos energéticos y de la actualización de los factores. Las empresas pueden mejorar su desempeño en Alcance 2 mediante la adquisición de energía de fuentes renovables o mediante la implementación de medidas de eficiencia energética en sus procesos. La estandarización de estos cálculos permite a las organizaciones comparar sus resultados con benchmarks internacionales y establecer objetivos claros de reducción de emisiones. La gestión efectiva del Alcance 2 es, por tanto, un componente esencial para la estrategia de mitigación de GEI [2].

El Alcance 3 es el más amplio y complejo, ya que incluye todas aquellas emisiones indirectas que se producen en la cadena de valor de la organización, pero que no están incluidas en los Alcances 1 y 2. Este alcance abarca una gran variedad de actividades, desde la extracción y producción de bienes y servicios adquiridos hasta la disposición final de productos, pasando por el transporte de insumos, los viajes de negocios y el desplazamiento de empleados. Debido a su complejidad, la cuantificación del Alcance 3 es un reto metodológico, ya que requiere la recopilación de datos de múltiples fuentes y la aplicación de diversos factores de emisión. El GHG Protocol establece un marco específico para la medición de estas emisiones, permitiendo a las organizaciones obtener una visión completa de su impacto ambiental indirecto [3].

La definición del Alcance 3 se fundamenta en la necesidad de capturar las emisiones que, aunque no se generen directamente en las operaciones de la empresa, son consecuencia de su actividad económica y de sus interacciones con proveedores, clientes y otros actores de la cadena de valor. Estas emisiones son fundamentales para una contabilidad ambiental integral, ya que pueden representar la mayor parte de la huella de carbono de una organización. Sin embargo, la medición del Alcance 3 presenta desafíos significativos, pues depende de la disponibilidad de datos precisos y de la correcta aplicación de metodologías de cálculo que permitan integrar múltiples fuentes de emisiones. El análisis de este alcance permite identificar oportunidades de mejora a lo largo de

toda la cadena de suministro y fomentar la colaboración entre diferentes actores para reducir el impacto ambiental global [3].

El Corporate Accounting and Reporting Standard del GHG Protocol se centra en la cuantificación y el reporte de las emisiones que la organización controla directamente (Alcance 1 y 2), mientras que el Corporate Value Chain (Scope 3) Standard se enfoca en las emisiones indirectas de la cadena de valor. Esta diferenciación permite que las empresas puedan gestionar de manera efectiva tanto las emisiones internas como aquellas generadas en sus relaciones comerciales. El enfoque dual de estos estándares es fundamental para una estrategia integral de mitigación, ya que obliga a la organización a considerar todos los aspectos de su impacto ambiental, desde la producción de energía hasta la distribución y el consumo de productos y servicios. La separación entre ambos estándares facilita la asignación de responsabilidades y la implementación de medidas específicas para reducir cada tipo de emisión [4].

La adopción de estos estándares internacionales permite a las organizaciones mejorar la transparencia en la contabilidad de GEI, lo que es fundamental para la rendición de cuentas ante inversores, clientes y organismos reguladores. La consistencia en la medición y el reporte de las emisiones, garantizada por el GHG Protocol, asegura que los inventarios sean comparables a nivel global y que se puedan identificar áreas de mejora de forma sistemática. Además, la utilización de un marco normativo reconocido internacionalmente facilita la verificación externa de los datos, lo que fortalece la credibilidad de la información ambiental reportada. Este proceso de estandarización es crucial para que las empresas puedan integrar de forma coherente sus estrategias de reducción de emisiones y avanzar hacia una operación más sostenible [4].

La aplicación práctica de las definiciones de Alcance 1, 2 y 3 en la contabilidad de GEI ha permitido a las empresas identificar y gestionar de forma más efectiva sus fuentes de emisión. Las emisiones de Alcance 1 se gestionan a través de controles operativos internos, mientras que las de Alcance 2 se abordan mediante estrategias de eficiencia energética y la transición a fuentes renovables. En contraste, las emisiones de Alcance 3 requieren una colaboración más amplia a lo largo de la cadena de valor, lo que implica trabajar juntamente con proveedores, clientes y otros actores para



reducir el impacto ambiental. Este enfoque integral no solo mejora el desempeño ambiental, sino que también fomenta la innovación y la competitividad en el mercado. La claridad en la definición de cada alcance permite a las organizaciones asignar recursos y establecer prioridades de mitigación con mayor precisión [5].

Los estándares del GHG Protocol han sido adoptados globalmente debido a su robustez y flexibilidad, permitiendo su aplicación en diversos sectores y contextos operativos. La metodología permite a las organizaciones no solo medir sus emisiones de GEI, sino también evaluar la efectividad de las estrategias implementadas para reducirlas. La diferenciación entre los distintos alcances es fundamental para entender la complejidad de las emisiones y para desarrollar políticas ambientales que aborden tanto las fuentes directas como las indirectas. Esta clasificación facilita la identificación de oportunidades de mejora en áreas que, tradicionalmente, han sido difíciles de cuantificar, como las emisiones derivadas de la cadena de suministro o de actividades de desplazamiento. El GHG Protocol, por tanto, se erige como un instrumento esencial para la gestión ambiental a nivel corporativo y para el diseño de estrategias de reducción de emisiones a largo plazo [5].

La integración de los estándares del GHG Protocol en la estrategia ambiental de una organización permite el desarrollo de inventarios completos y verificables que contribuyen a la transparencia en el reporte de GEI. Al clasificar las emisiones en Alcance 1, 2 y 3, se obtiene una visión detallada que facilita la identificación de los puntos críticos y la evaluación del impacto ambiental de cada actividad. Este enfoque se traduce en una mayor capacidad para establecer metas de reducción, implementar medidas de eficiencia y monitorear el progreso de forma continua. La aplicación de estos estándares requiere la adopción de metodologías de recolección de datos rigurosas y el uso de factores de emisión actualizados, lo que garantiza la fiabilidad y la comparabilidad de los resultados. Este nivel de detalle y precisión es esencial para que las estrategias de mitigación sean efectivas y para que las organizaciones puedan adaptarse a las exigencias regulatorias y del mercado [6].

La implementación de la clasificación de emisiones según el GHG Protocol implica la adopción de sistemas de monitoreo y gestión de datos que permitan capturar con precisión la actividad operativa de la organización. Para el Alcance 1, esto significa la instalación de medidores y sistemas de control en las fuentes de combustión interna, mientras que para el Alcance 2 se requiere el registro detallado del consumo de energía y la aplicación de factores de emisión específicos para cada fuente de electricidad. En el caso del Alcance 3, la complejidad aumenta, ya que se deben integrar datos provenientes de toda la cadena de valor, lo que a menudo implica la colaboración con múltiples actores. La adopción de herramientas digitales y software especializado facilita este proceso, asegurando que los datos sean recogidos, analizados y reportados de forma sistemática. La precisión en la medición es esencial para la credibilidad del inventario ambiental y para el cumplimiento de las normativas internacionales, lo que subraya la importancia de la adopción de estos estándares [7].

El enfoque del GHG Protocol para la contabilización de GEI ha sido un catalizador para la innovación en la medición y la gestión ambiental. La estandarización de las definiciones y la metodología permite que las organizaciones de diferentes sectores y regiones puedan comparar sus resultados y aprender de las mejores prácticas. Esto ha impulsado la adopción de tecnologías de eficiencia energética y de gestión avanzada de emisiones, contribuyendo a una reducción global de la huella de carbono. La capacidad para desglosar las emisiones por alcances facilita la identificación de áreas de intervención y permite a las empresas implementar estrategias específicas para cada tipo de emisión. Este proceso de innovación continua es fundamental para avanzar en la transición hacia una economía baja en carbono y para responder de manera efectiva a los desafíos del cambio climático [8].

La aplicación del Corporate Accounting and Reporting Standard del GHG Protocol permite a las organizaciones gestionar sus emisiones internas de forma sistemática. Este estándar se enfoca en las emisiones directas y en el consumo energético adquirido, ofreciendo un marco claro para la medición, reporte y verificación de los GEI. La claridad en la definición de Alcance 1 y Alcance 2 facilita la implementación de medidas de control y la evaluación de la eficiencia operativa. La adopción de este estándar ha permitido que numerosas empresas establezcan objetivos de

reducción concretos y cuantificables, lo que ha contribuido a mejorar su desempeño ambiental. La precisión y la transparencia en el reporte de GEI son elementos clave para fortalecer la reputación de la organización y para cumplir con las exigencias de los stakeholders [8].

Por otro lado, el Corporate Value Chain (Scope 3) Standard se centra en la cuantificación de las emisiones indirectas que se generan a lo largo de la cadena de valor de la organización. Este estándar abarca una amplia gama de actividades, desde la extracción de materias primas hasta el uso final de los productos y servicios, incluyendo desplazamientos, transporte y gestión de residuos. La medición del Alcance 3 es especialmente desafiante, ya que requiere la recopilación de datos de diversas fuentes y la aplicación de métodos de cálculo que permitan integrar estas emisiones de forma coherente. Sin embargo, la incorporación de este alcance es esencial para obtener una visión completa de la huella de carbono de la organización. La adopción de este estándar permite identificar oportunidades de reducción de emisiones que, aunque no sean controladas directamente, impactan significativamente en la huella global [9].

La diferenciación entre los distintos alcances de emisiones resulta crucial para el diseño de estrategias de mitigación efectivas. Mientras que el control de las emisiones de Alcance 1 y 2 puede gestionarse a través de medidas internas y mejoras en la eficiencia operativa, el Alcance 3 exige una colaboración interorganizacional y la adopción de prácticas sostenibles en toda la cadena de valor. Esta distinción es fundamental para establecer objetivos de reducción claros y para asignar responsabilidades a lo largo de la cadena de suministro. La transparencia en el reporte de estos alcances permite que las organizaciones no solo midan su impacto, sino que también identifiquen las áreas donde la innovación y la mejora pueden generar reducciones significativas en las emisiones de GEI [9].

La integración de ambos estándares del GHG Protocol – el Corporate Accounting and Reporting Standard y el Corporate Value Chain Standard – constituye un pilar fundamental en la gestión ambiental moderna. Esta integración permite que las empresas aborden de manera integral tanto las emisiones directas como las indirectas, ofreciendo una visión global del impacto ambiental de sus operaciones. La aplicación conjunta de estos estándares se traduce en inventarios de GEI

robustos y transparentes, que pueden ser verificados externamente y que sirven como base para el establecimiento de metas ambiciosas de reducción de emisiones. La comparación de datos a nivel internacional se ve facilitada por este enfoque estandarizado, lo que promueve la competencia y la adopción de mejores prácticas en la industria [10].

La implementación de la metodología del GHG Protocol en la medición de la huella de carbono ha generado importantes avances en la capacidad de las organizaciones para gestionar sus emisiones. Los inventarios resultantes permiten no solo cuantificar el impacto ambiental, sino también identificar las áreas de oportunidad para la optimización de procesos y la reducción de GEI. Este enfoque integral se ha demostrado eficaz en numerosos estudios de caso, donde la adopción de métodos estandarizados ha permitido reducir de forma significativa la huella de carbono. La aplicación de estos estándares es esencial para que las empresas puedan alinearse con las políticas internacionales y cumplir con los objetivos establecidos en el marco del Acuerdo de París y otros compromisos globales [10].

Las Guías del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, publicadas inicialmente en 2006, representan un hito fundamental en la estandarización de los métodos para cuantificar las emisiones a nivel nacional. Estas directrices ofrecen un marco metodológico riguroso que permite a los países identificar y clasificar las fuentes de emisiones de GEI, facilitando la elaboración de inventarios que sean consistentes y comparables a nivel internacional [1]. Además, establecen principios claros para la recolección, el procesamiento y el reporte de datos, asegurando que las estimaciones sean transparentes y reproducibles. La estructura de estas guías se organiza en capítulos temáticos, lo que permite abordar de forma específica distintos sectores y actividades, desde la producción de energía hasta la gestión de residuos. Este enfoque integral es esencial para que las políticas climáticas se basen en datos confiables y se diseñen estrategias de mitigación efectivas.

El conjunto de las Guías del IPCC se fundamenta en la aplicación de métodos científicos probados que integran tanto datos empíricos como modelos de estimación. La versión de 2006 se caracteriza por su amplia cobertura y la rigurosidad en la definición de las fronteras del inventario,

estableciendo la necesidad de diferenciar entre emisiones directas e indirectas. La claridad en las definiciones y en los procedimientos de cálculo permite que los países puedan adaptar estos lineamientos a sus contextos específicos, garantizando que la información reportada refleje de forma fiel las actividades productoras de GEI. Asimismo, estas guías enfatizan la importancia de la consistencia en la aplicación de metodologías a lo largo del tiempo, lo que facilita el seguimiento de tendencias y la evaluación de los avances en materia de reducción de emisiones [1]. Este marco metodológico se ha convertido en la base para numerosos estudios y políticas nacionales orientadas a la mitigación del cambio climático.

Dentro del marco de las Guías IPCC, cada capítulo se dedica a un sector o fuente de emisión particular, permitiendo una evaluación detallada de las contribuciones de cada actividad. Uno de los capítulos relevantes para el sector del agua y las infraestructuras es el dedicado a la gestión de residuos, donde se abordan las emisiones derivadas de la disposición final y el tratamiento de desechos. Este enfoque especializado permite que los inventarios ambientales incluyan estimaciones precisas de las emisiones indirectas que, en muchos casos, representan un porcentaje significativo de la huella de carbono total. La estructuración temática facilita la incorporación de datos específicos y el uso de factores de emisión ajustados a las condiciones locales, contribuyendo a la fiabilidad de los resultados [1]. Este nivel de detalle es crucial para que las políticas ambientales sean lo más efectivas posible en la reducción de GEI.

Con el avance de la ciencia y la creciente disponibilidad de datos, las Guías del IPCC han sido objeto de revisiones y actualizaciones. La Refinement de 2019 es un ejemplo notable en el que se han incorporado mejoras significativas para el cálculo de emisiones en sectores específicos, incluyendo el tratamiento de aguas residuales. En este capítulo se actualizan los factores de emisión y se refinan los métodos de cálculo, lo que permite una estimación más precisa de las emisiones de metano y óxido nitroso generadas en procesos biológicos. Esta revisión se ha realizado en respuesta a la necesidad de contar con datos más precisos y adaptados a las nuevas tecnologías y condiciones operativas que se han desarrollado en las últimas décadas [2]. La actualización metodológica refleja la evolución del conocimiento científico y la importancia de contar con inventarios ambientales robustos.

El capítulo dedicado al tratamiento de aguas residuales en la Refinement 2019 se centra en proporcionar directrices específicas para cuantificar las emisiones derivadas de procesos biológicos y químicos en plantas de tratamiento. Se enfatiza la importancia de considerar factores como la carga orgánica, la concentración de materia en suspensión y otros parámetros operativos que influyen en la generación de GEI. La metodología propuesta permite desglosar las emisiones a lo largo de diferentes etapas del tratamiento, desde la fase de pretratamiento hasta la disposición final de lodos, lo que facilita la identificación de los puntos críticos de emisión. Esta aproximación es especialmente relevante para infraestructuras como las EDAR, donde la complejidad de los procesos exige un análisis detallado para poder implementar medidas de mitigación efectivas [2]. El refinamiento de estos métodos es clave para mejorar la precisión de los inventarios y para apoyar la toma de decisiones en la gestión ambiental.

La importancia de utilizar las Guías IPCC radica en que proporcionan una base científica sólida para la elaboración de inventarios nacionales de GEI, lo que a su vez permite a los gobiernos y a las empresas establecer políticas y estrategias para la reducción de emisiones. La consistencia y la transparencia en la medición de GEI son esenciales para evaluar el progreso en la lucha contra el cambio climático, y las directrices del IPCC facilitan la comparación de datos entre diferentes países y sectores. La aplicación de estos lineamientos garantiza que las estimaciones sean compatibles y que se puedan identificar áreas de mejora a nivel global, lo que es fundamental en el contexto actual de crecientes compromisos internacionales para mitigar el calentamiento global [1]. Este enfoque estandarizado es indispensable para que la comunidad internacional pueda coordinar esfuerzos y compartir buenas prácticas en la gestión ambiental.

Las guías también subrayan la necesidad de ajustar las metodologías de cálculo en función de la disponibilidad y calidad de los datos, lo que permite que las estimaciones sean lo más precisas posible. En el caso del tratamiento de aguas residuales, la Refinement 2019 destaca la importancia de incorporar datos específicos de cada planta, como los niveles de carga orgánica y las condiciones operativas particulares, para poder obtener estimaciones realistas de las emisiones. Este ajuste de los métodos a las condiciones locales es esencial para que los inventarios reflejen de manera fiel la realidad operativa y para que se puedan desarrollar estrategias de reducción de

emisiones adaptadas a cada situación. La flexibilidad de las guías IPCC permite, por tanto, la actualización continua de los inventarios en función de la evolución tecnológica y de la mejora en la recopilación de datos [2]. Esta capacidad de adaptación es uno de los elementos clave que ha contribuido a la relevancia de estas guías a lo largo del tiempo.

Otro aspecto central de las Guías IPCC es la estandarización en la presentación y el reporte de las emisiones. La metodología establecida permite que los inventarios de GEI sean transparentes y verificables, lo que facilita la rendición de cuentas ante organismos internacionales y entidades reguladoras. La claridad en la definición de fronteras operativas, la identificación de fuentes de emisión y la aplicación de factores de emisión consistentes son elementos que fortalecen la credibilidad de los datos. Esta transparencia es crucial para que los datos se puedan comparar y para que se pueda evaluar el impacto de las políticas de reducción de emisiones a lo largo del tiempo. La homogeneidad en el reporte es un requisito indispensable en el marco de acuerdos internacionales como el Acuerdo de París, que exige a los países mantener inventarios precisos y actualizados de sus emisiones de GEI [1]. De esta forma, las guías facilitan una comunicación efectiva y coherente de los resultados ambientales.

La aplicación de las Guías IPCC también fomenta la innovación en la medición y gestión de las emisiones. Al establecer un marco metodológico claro y actualizado, estas directrices estimulan el desarrollo de nuevas herramientas y tecnologías que mejoran la recopilación de datos y la precisión de los inventarios. La integración de métodos avanzados, como el uso de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, se complementa con los lineamientos de las guías, permitiendo que las estimaciones de emisiones sean más dinámicas y representativas de las condiciones operativas actuales. Esta sinergia entre la tecnología y la metodología ha permitido que el sector del tratamiento de aguas residuales avance significativamente en la reducción de su huella de carbono, ofreciendo modelos que pueden ser replicados en diferentes contextos y escalas [2]. La constante actualización de las guías IPCC es, por tanto, un motor esencial para la innovación y la mejora continua en la gestión ambiental.

La actualización de las guías, particularmente la Refinement 2019 para el tratamiento de aguas residuales, responde a la necesidad de incorporar nuevos conocimientos y datos empíricos que han surgido en las últimas décadas. Este refinamiento ha permitido ajustar los factores de emisión y los métodos de cálculo, especialmente para procesos biológicos que son críticos en la generación de metano y óxido nitroso. La inclusión de estos avances en las guías mejora la precisión de los inventarios y contribuye a una mejor comprensión de la dinámica de las emisiones en las plantas de tratamiento de aguas. La Refinement 2019 también subraya la importancia de la medición a nivel de planta, permitiendo que las estimaciones sean más específicas y adaptadas a las condiciones reales de operación. Este nivel de detalle es fundamental para el diseño de estrategias de mitigación que sean efectivas y para la toma de decisiones basada en datos robustos [2]. La actualización metodológica es, sin duda, un avance significativo en el campo de la contabilidad de GEI.

La implementación de estas guías en inventarios nacionales y empresariales ha permitido que se establezcan bases sólidas para la formulación de políticas ambientales. La armonización de los métodos de cálculo y la estandarización en el reporte de las emisiones facilitan la comparación entre diferentes sectores y países, lo que es esencial para el desarrollo de estrategias globales de reducción de GEI. La aplicación de las Guías IPCC se ha convertido en un requisito indispensable para acceder a financiamientos y para cumplir con los compromisos internacionales en materia de cambio climático. Este marco metodológico ha sido adoptado por numerosas instituciones y empresas, lo que ha impulsado la transparencia y la mejora continua en la gestión ambiental. La consistencia en la medición es clave para evaluar el progreso en la reducción de emisiones y para orientar futuras políticas climáticas [1]. La estandarización global permite que se compartan mejores prácticas y que se fomente la innovación en la gestión de GEI.

La relevancia de las Guías IPCC se extiende también a la formación y capacitación de los profesionales en el área de la gestión ambiental. La aplicación de estos lineamientos no solo aporta rigor científico, sino que también proporciona una estructura clara que facilita la comprensión y la implementación de metodologías de cálculo de GEI. La formación en estos estándares es esencial para que los profesionales puedan diseñar y gestionar inventarios ambientales precisos, lo que a su



vez fortalece la capacidad de las organizaciones para adoptar medidas de mitigación efectivas. La difusión de estas guías a nivel académico y profesional ha contribuido a la consolidación de un lenguaje común en el ámbito de la contabilidad de emisiones, lo que es fundamental para el intercambio de información y para la colaboración internacional en la lucha contra el cambio climático [1]. La capacitación basada en estos estándares se ha convertido en una prioridad en muchos países, impulsando el desarrollo de herramientas y sistemas de monitoreo que mejoren la precisión de los inventarios.

La integración de las guías IPCC en la política climática y en la gestión operativa de las empresas permite establecer objetivos de reducción de emisiones que sean ambiciosos y medibles. Las directrices proporcionan los fundamentos para identificar las fuentes de GEI y para establecer estrategias de mitigación basadas en datos concretos y verificables. Este enfoque es especialmente relevante en sectores complejos, como el tratamiento de aguas residuales, donde la diversidad de procesos y la variabilidad en las condiciones operativas requieren de un análisis detallado. La aplicación de estas metodologías permite a las empresas diseñar planes de acción que respondan a las exigencias regulatorias y a las expectativas del mercado, promoviendo la innovación y la eficiencia en la gestión ambiental [2]. La estandarización en el reporte de emisiones es, por tanto, un pilar fundamental para la implementación de estrategias de sostenibilidad a largo plazo.

Tabla 3. Aplicación de marcos normativos al estudio de huella de carbono en EDAR

| <b>Normativa / Guía</b> | <b>Contenido clave</b>   | <b>Aplicación en el TFM</b>  |
|-------------------------|--|--|
| GHG Protocol (2015)     | Clasificación de emisiones por Alcance (1, 2, 3). Metodología por categoría.     | Define la estructura del inventario y justifica el foco en categorías 5, 7 y 1.    |
| ISO 14064-1:2018        | Requisitos para cuantificación organizacional de GEI. Criterios de verificación. | Aplica en el diseño metodológico y valida trazabilidad de datos operativos reales. |
| ISO 14067:2018          | Cuantificación de huella de carbono de productos.                                | Referencia para adaptación metodológica en procesos específicos de                 |

|                             |  |  |
|-----------------------------|--|--|
|                             |  | EDAR.  |
| Guías IPCC (2006, 2019)     | Métodos de estimación de CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O en aguas residuales. | Soporte técnico para modelar emisiones de proceso (no foco principal en el TFM). |
| Registro de Huella (MITERD) | Requisitos del inventario oficial en España.                                     | Se considera como estándar de reporte de emisiones por categoría de actividad.   |

Fuente: Elaboración propia a partir de [1]–[3], ISO y IPCC.

El uso de las guías IPCC, tanto la versión de 2006 como la Refinement 2019, ha sido crucial para fomentar la transparencia y la rendición de cuentas en la medición de GEI. Estas directrices establecen un marco de referencia que permite a las organizaciones documentar de manera detallada los métodos, datos y supuestos utilizados en la elaboración de inventarios ambientales. La claridad en la presentación de la información es fundamental para que los datos sean verificables y comparables, lo que facilita la evaluación del desempeño ambiental y la identificación de áreas de mejora. La transparencia en el proceso de medición no solo mejora la credibilidad de los inventarios, sino que también fortalece la capacidad de los gobiernos y las empresas para tomar decisiones basadas en evidencia, lo que es esencial para la implementación de políticas efectivas de mitigación del cambio climático [1]. La aplicación de un marco metodológico riguroso y estandarizado es, en última instancia, la base para avanzar hacia una economía más sostenible.

La adaptación de las metodologías IPCC al contexto específico de cada sector ha permitido que las estimaciones de GEI sean más precisas y reflejen mejor la realidad operativa. En el caso del tratamiento de aguas residuales, la Refinement 2019 ha incorporado nuevos datos y métodos de cálculo que tienen en cuenta las particularidades de los procesos biológicos y químicos presentes en las EDAR. Esta actualización metodológica permite obtener estimaciones más ajustadas a la realidad y facilita la identificación de estrategias de reducción de emisiones específicas para este sector. La capacidad para adaptar las guías a diferentes contextos es una de las fortalezas del marco IPCC, ya que permite que cada país y cada industria puedan desarrollar inventarios ambientales que respondan a sus necesidades y condiciones particulares [2]. Este enfoque

adaptable es fundamental para asegurar que las estrategias de mitigación sean efectivas y para fomentar la innovación en la gestión ambiental.

La aplicación de las guías IPCC en la elaboración de inventarios nacionales y empresariales ha contribuido a la estandarización global de los métodos de reporte de GEI. Esta estandarización es clave para que los datos sean comparables y para que se puedan establecer benchmarks y objetivos de reducción a nivel internacional. La homogeneidad en la medición y el reporte facilita la identificación de las mejores prácticas y la adopción de tecnologías de mitigación que sean efectivas en distintos contextos. La estandarización también promueve la transparencia y la rendición de cuentas, aspectos esenciales para que las políticas climáticas sean creíbles y sostenibles a largo plazo [1]. El marco IPCC, en todas sus versiones, se ha convertido en la referencia principal para la cuantificación de emisiones, lo que ha permitido una mayor coordinación internacional en la lucha contra el cambio climático.

### **3.3.2 Legislación y guías nacionales (caso español)**

La legislación española en materia de cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero se ha consolidado en un marco normativo que complementa las directrices internacionales y adapta los estándares a la realidad del país. En este contexto, diversas entidades oficiales han desarrollado guías y herramientas para la cuantificación y reporte de GEI, lo que permite que sectores como el del agua y el transporte cuenten con datos precisos y verificables [1]. La armonización de estas normativas con los estándares internacionales, como la ISO 14064 y el GHG Protocol, ha sido crucial para la mejora continua de la gestión ambiental en España. Además, la transparencia en el reporte de emisiones es fundamental para la rendición de cuentas a nivel nacional, lo que impulsa a las empresas a adoptar prácticas sostenibles. Este entorno normativo favorece la implementación de políticas públicas que incentiven la reducción de la huella de carbono y la transición hacia energías más limpias.

La Oficina Española de Cambio Climático (OECC) desempeña un papel central en el desarrollo y la difusión de información sobre GEI en España. Esta entidad es responsable de recopilar, analizar y difundir datos oficiales sobre emisiones, ofreciendo una base sólida para la elaboración de

inventarios de GEI. La OECC se encarga de coordinar estudios y reportes que permiten evaluar el impacto ambiental de diversas actividades, lo que facilita la comparación de datos a nivel nacional e internacional [2]. Sus informes son utilizados tanto por organismos públicos como por empresas privadas para diseñar estrategias de mitigación y adaptación frente al cambio climático. Asimismo, la OECC colabora estrechamente con otros organismos y ministerios para asegurar la coherencia en la política climática del país. Esta coordinación institucional es esencial para establecer objetivos claros y medibles de reducción de emisiones.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) también tiene una función destacada en el marco normativo español, impulsando la elaboración y actualización de directrices relacionadas con la gestión ambiental. El MITERD actúa como ente rector que establece las políticas y estrategias nacionales para la reducción de GEI, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y la optimización de recursos en sectores clave. Entre sus iniciativas se encuentran programas de eficiencia energética, incentivos para energías renovables y mecanismos de reporte ambiental que permiten medir y controlar la huella de carbono [3]. La labor del MITERD es fundamental para alinear las políticas nacionales con los compromisos internacionales adquiridos por España en el marco del Acuerdo de París. Además, sus directrices se integran en la normativa operativa de numerosas empresas, orientándolas hacia una gestión ambiental más rigurosa y transparente.

En el ámbito de la cuantificación de emisiones, los factores de emisión oficiales son elementos críticos para garantizar la precisión de los inventarios ambientales. En España, estos factores son definidos y actualizados por organismos como la OECC y el MITERD, y se utilizan para convertir datos operativos en emisiones expresadas en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Estos factores cubren una amplia gama de actividades, desde la combustión de combustibles fósiles hasta el manejo de residuos y la gestión del transporte. La utilización de estos valores oficiales asegura que las estimaciones sean consistentes y comparables, facilitando la integración de datos en modelos de análisis de ciclo de vida y en reportes de sostenibilidad [4]. La actualización periódica de estos factores es esencial para reflejar las mejoras tecnológicas y los cambios en las prácticas operativas, garantizando la vigencia de los cálculos ambientales.

La normativa española en materia de GEI se fundamenta en la aplicación de guías y estándares que han sido adaptados al contexto local, permitiendo una valoración precisa del impacto ambiental. Documentos emitidos por el MITERD y la OECC ofrecen metodologías detalladas para la elaboración de inventarios de emisiones, abarcando tanto emisiones directas como indirectas. Estas guías establecen criterios claros para la delimitación de fronteras organizacionales, la recolección de datos y la aplicación de factores de emisión, lo que facilita la comparación entre diferentes sectores y regiones [5]. La estandarización de estos métodos es fundamental para que las empresas españolas puedan cumplir con las obligaciones de reporte y para que el Estado pueda evaluar el progreso en la reducción de GEI a nivel nacional.

La integración de la legislación y guías nacionales con los estándares internacionales crea un marco de referencia robusto para la gestión ambiental en el país. Este marco permite que las empresas dispongan de herramientas precisas para cuantificar su huella de carbono, basadas en metodologías validadas y reconocidas globalmente. El uso de factores de emisión oficiales, junto con la aplicación de normativas como la ISO 14064, garantiza que los inventarios ambientales sean consistentes y confiables [6]. Esta coherencia metodológica no solo facilita la comparación de datos a nivel internacional, sino que también impulsa la innovación y la mejora continua en la gestión de emisiones en sectores críticos como el agua y el transporte. La adopción de este marco normativo es, por tanto, un paso esencial para avanzar hacia una economía baja en carbono.

El papel de la OECC en la recopilación y difusión de información sobre GEI es complementado por la labor del MITERD, que orienta las políticas de transición ecológica en España. Juntas, estas instituciones garantizan que las metodologías de cálculo se mantengan actualizadas y sean adecuadas para el análisis del impacto ambiental. La coordinación entre estas entidades permite que se desarrollen herramientas específicas para la medición de emisiones, adaptadas a las necesidades y condiciones operativas de diversos sectores. Esta colaboración institucional es crucial para asegurar que la información utilizada en los inventarios ambientales sea fiable y esté alineada con las mejores prácticas internacionales [7].

La aplicación de la legislación nacional en la medición de emisiones tiene implicaciones directas en la competitividad de las empresas y en la formulación de políticas públicas. El cumplimiento de las directrices establecidas por el MITERD y la OECC es fundamental para acceder a incentivos y subvenciones que promuevan la transición hacia tecnologías más limpias. Además, las empresas que integran estos estándares en sus procesos operativos pueden mejorar su imagen y aumentar la confianza de los inversores, consumidores y otros stakeholders. La transparencia en el reporte de GEI, basada en factores de emisión oficiales, se ha convertido en un requisito esencial para la sostenibilidad corporativa y para el cumplimiento de compromisos internacionales en materia de cambio climático [8].

En sectores críticos, como el tratamiento de aguas residuales y el transporte, la aplicación de la normativa española permite identificar de manera precisa los puntos críticos de emisión. Las guías desarrolladas por el MITERD y la OECC establecen procedimientos específicos para cada actividad, lo que facilita la implementación de medidas correctivas y la optimización de los procesos operativos. Este enfoque sectorial es fundamental para la elaboración de estrategias de reducción de GEI que sean efectivas y adaptadas a las condiciones locales. La medición precisa de las emisiones en estos sectores contribuye a mejorar la eficiencia operativa y a disminuir el impacto ambiental, promoviendo una gestión sostenible y resiliente [9].

La utilización de factores de emisión oficiales en el análisis de la huella de carbono permite a las organizaciones obtener datos comparables y consistentes, fundamentales para la toma de decisiones estratégicas. Estos factores, elaborados y actualizados por organismos como la OECC, proporcionan un valor objetivo que facilita la evaluación del desempeño ambiental a lo largo del tiempo. La estandarización en la aplicación de estos factores asegura que las metodologías de cálculo sean reproducibles y que los resultados obtenidos sean sólidos y verificables [10]. Esta coherencia en la medición es indispensable para evaluar el progreso en la reducción de emisiones y para ajustar las estrategias de mitigación de manera oportuna.

El marco normativo español, apoyado por la OECC y el MITERD, establece una serie de directrices que orientan a las empresas en la elaboración de inventarios de GEI. Estas directrices incluyen la

definición de fronteras operativas, la identificación de fuentes de emisión y la aplicación de metodologías de cálculo que se ajusten a los estándares internacionales. La implementación de estos lineamientos permite que las organizaciones obtengan una visión integral de su impacto ambiental y que puedan establecer metas de reducción ambiciosas y medibles [11]. La normativa promueve la adopción de tecnologías limpias y la mejora continua en la gestión ambiental, lo que resulta fundamental para enfrentar los desafíos del cambio climático en el contexto español.

La integración de la legislación y las guías nacionales en la gestión de GEI tiene un impacto directo en la formulación de políticas públicas. Los datos recopilados a través de inventarios ambientales basados en factores de emisión oficiales se utilizan para establecer objetivos de reducción de GEI a nivel nacional y regional. Este proceso permite que los gobiernos diseñen estrategias de transición energética y de eficiencia operativa que sean realistas y respaldadas por información cuantitativa robusta [12]. La transparencia y la comparabilidad de estos datos son esenciales para la rendición de cuentas y para la evaluación del progreso en la lucha contra el cambio climático. La aplicación de estas políticas no solo beneficia al medio ambiente, sino que también impulsa el desarrollo económico y la innovación en sectores clave.

La consolidación del marco normativo español y la utilización de factores de emisión oficiales establecen las bases para una gestión ambiental coherente y eficiente en el país. La coordinación entre la OECC, el MITERD y otros organismos permite que las metodologías de cálculo se mantengan actualizadas y sean aplicables a diversos sectores, garantizando la integridad de los inventarios de GEI. Este enfoque integral es fundamental para que las empresas puedan cumplir con los compromisos internacionales y contribuir de manera efectiva a la mitigación del cambio climático [13]. La normativa nacional, al estar en sintonía con los estándares internacionales, ofrece un camino claro para la transición hacia una economía baja en carbono y para la implementación de estrategias de sostenibilidad que respondan a los desafíos del siglo XXI.

Los programas voluntarios en España constituyen iniciativas que permiten a las empresas y organizaciones cuantificar, reportar y compensar su huella de carbono de manera proactiva, sin que la participación sea obligatoria por ley. Estos programas ofrecen marcos metodológicos

basados en normas internacionales, facilitando la integración de inventarios de GEI en la estrategia empresarial y el acceso a herramientas de compensación y absorción de carbono [1]. A través de estos programas, las entidades pueden registrar sus emisiones, identificar áreas de mejora y, a su vez, participar en proyectos de reforestación o de energía renovable que contribuyan a neutralizar sus emisiones. Esta adopción voluntaria es clave para avanzar hacia una economía baja en carbono y fomentar una cultura de responsabilidad ambiental en el sector empresarial español [1].

El Registro de Huella de Carbono es uno de los programas más destacados en el país, ya que permite a las organizaciones documentar y publicar sus emisiones de GEI de manera transparente. Este registro, gestionado por organismos especializados, ofrece un sistema estandarizado para la cuantificación y el seguimiento de la huella de carbono, alineándose con directrices internacionales como ISO 14064 y el GHG Protocol [2]. La transparencia en la publicación de estos datos no solo mejora la rendición de cuentas, sino que también estimula la competencia y el intercambio de buenas prácticas entre las empresas. Además, el registro contribuye a la formulación de políticas públicas al proporcionar una base de datos consolidada sobre el impacto ambiental de diversos sectores [2].

La compensación de emisiones es otra faceta importante de los programas voluntarios, que permite a las empresas equilibrar sus emisiones mediante la inversión en proyectos que absorban CO<sub>2</sub> o reduzcan emisiones en otras áreas. Estos proyectos pueden incluir la reforestación, la restauración de ecosistemas, o el desarrollo de tecnologías de energía renovable, todos ellos diseñados para capturar o evitar la emisión de GEI [3]. La compensación no sustituye la necesidad de reducir las emisiones en origen, pero ofrece una vía complementaria para alcanzar la neutralidad de carbono. La implementación de mecanismos de compensación ha ganado relevancia en el contexto de la economía circular y la responsabilidad social corporativa, aportando beneficios ambientales y sociales [3].

Dentro de este marco, los proyectos de absorción de carbono desempeñan un papel crucial, ya que se centran en la captación y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en ecosistemas naturales o mediante tecnologías de captura y almacenamiento. En España, diversas iniciativas de reforestación y



restauración de bosques han sido promovidas para aumentar la capacidad de absorción de carbono de la tierra [4]. Estos proyectos son evaluados en función de su capacidad para almacenar carbono a lo largo del tiempo y se integran en los programas de compensación, permitiendo que las emisiones se compensen parcialmente mediante la mejora de los sumideros naturales. La verificación de la capacidad de absorción es fundamental para garantizar la eficacia de estos proyectos y para respaldar la credibilidad de los mecanismos de compensación [4].

Otro aspecto relevante de los programas voluntarios es el fomento de la innovación en la medición y gestión de emisiones. Muchas empresas han desarrollado herramientas y metodologías internas que, complementadas con los marcos normativos, permiten un seguimiento continuo y preciso de su huella de carbono [5]. Estas iniciativas internas suelen integrarse con plataformas públicas y registros oficiales, promoviendo una mayor integración de datos y facilitando la identificación de oportunidades de mejora en la eficiencia operativa. La innovación en este ámbito no solo contribuye a la reducción de GEI, sino que también mejora la competitividad de las empresas al optimizar el uso de recursos y reducir costos asociados al consumo energético [5].

La participación en estos programas voluntarios también tiene implicaciones estratégicas para la imagen corporativa y la responsabilidad social empresarial. Las empresas que adoptan medidas proactivas para medir y compensar su huella de carbono suelen ser reconocidas por su compromiso con la sostenibilidad y la lucha contra el cambio climático, lo que puede traducirse en ventajas competitivas en mercados cada vez más exigentes en términos de responsabilidad ambiental [6]. Además, la transparencia en el reporte de emisiones y en la compensación permite a las empresas fortalecer la confianza de inversores, clientes y reguladores. Esta confianza se refleja en la mejora de la reputación y en la posibilidad de acceder a incentivos y financiamientos verdes, promoviendo así un ciclo virtuoso de inversión en tecnologías limpias y en prácticas sostenibles [6].

Los programas voluntarios, al promover la cuantificación y compensación de la huella de carbono, ofrecen un marco para que las empresas se comprometan a alcanzar la neutralidad de carbono a mediano y largo plazo. Esta orientación estratégica está en consonancia con los objetivos globales

de reducción de GEI y con las políticas del Acuerdo de París, que exigen a los países y a las empresas la adopción de medidas concretas para mitigar el cambio climático [7]. La participación en estos programas puede ser un elemento diferenciador en la estrategia de sostenibilidad, permitiendo a las organizaciones establecer metas de reducción y evaluar su progreso de forma transparente y verificable. Además, la interacción con otras entidades y la participación en iniciativas colaborativas fomentan el intercambio de buenas prácticas y la mejora continua en la gestión ambiental [7].

La adopción de estos programas voluntarios es especialmente relevante en el sector de infraestructuras y servicios públicos, donde la complejidad de las operaciones y la diversidad de fuentes de emisiones requieren una gestión integral. En el caso del sector del agua, por ejemplo, la medición precisa de la huella de carbono y la implementación de mecanismos de compensación permiten optimizar tanto la operación de las plantas de tratamiento como la gestión de recursos. La aplicación de estas estrategias en infraestructuras críticas contribuye a la reducción global de GEI, mejorando la resiliencia de los servicios públicos y promoviendo un desarrollo sostenible a nivel local y nacional [8]. La integración de programas voluntarios con las prácticas operativas de las empresas es, por tanto, una herramienta clave para avanzar hacia una economía baja en carbono.

La experiencia acumulada en la participación en programas voluntarios a nivel internacional respalda la eficacia de estos mecanismos para la reducción de emisiones. Diversos estudios han mostrado que la implementación de registros de huella de carbono y de proyectos de compensación y absorción contribuye significativamente a mejorar la gestión ambiental en sectores de alta intensidad energética. La colaboración entre el sector privado y organismos gubernamentales ha permitido el desarrollo de políticas y programas que incentivan la adopción de tecnologías limpias y la optimización de procesos operativos [9]. Esta experiencia internacional se ha ido adaptando al contexto español, donde iniciativas específicas han sido promovidas por entidades como el MITERD y la OECC para facilitar la transición hacia una economía sostenible. La participación en estos programas fortalece la capacidad de las empresas para reducir su impacto ambiental y para posicionarse como líderes en responsabilidad social [9].

El sector del agua presenta una gran complejidad operativa y técnica que exige metodologías de cálculo específicas para evaluar adecuadamente su huella de carbono. Estas metodologías deben tener en cuenta no solo las emisiones directas derivadas del consumo energético y los procesos biológicos (Alcances 1 y 2), sino también las emisiones indirectas (Alcance 3), tales como las asociadas a la producción de reactivos, el desplazamiento del personal o la gestión de residuos [5], [14]. Por ello, la correcta medición requiere adaptar marcos normativos generales como ISO 14064 o el GHG Protocol a las particularidades del ciclo urbano del agua.

Uno de los enfoques más consolidados en este campo es el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), que permite cuantificar los impactos ambientales desde la captación de agua hasta la devolución del efluente tratado. Aplicado al tratamiento de aguas residuales, el LCA ha demostrado ser eficaz para identificar las fases críticas del proceso, como la aireación prolongada o la gestión de lodos, donde se producen emisiones significativas de  $N_2O$  y  $CH_4$  [1], [2]. Estas metodologías son particularmente útiles para comparar tecnologías de tratamiento y seleccionar las opciones más sostenibles desde el punto de vista climático [10].

En cuanto a normativas específicas, además de las ya mencionadas ISO 14040/44 (LCA) e ISO 14064 (inventarios organizacionales), destacan guías sectoriales como las promovidas por la International Water Association (IWA), que han sistematizado la incorporación de criterios de sostenibilidad en la gestión del ciclo integral del agua. La IWA proporciona marcos adaptables que integran el análisis energético, los indicadores de emisión y la evaluación del rendimiento ambiental de EDAR y ETAP [7].

Asimismo, se han desarrollado herramientas específicas de cálculo como Carbon Footprint for Water Utilities (CFWU) y Carbon Emissions Estimation Tool (CEET), promovidas por diversas entidades del sector hídrico internacional. Estas herramientas permiten estimar las emisiones de GEI a partir de parámetros operativos reales, como el consumo de energía eléctrica, los caudales tratados o la cantidad de lodos generados. Su versatilidad las hace útiles tanto para diagnósticos preliminares como para la elaboración de inventarios verificables [2], [6].

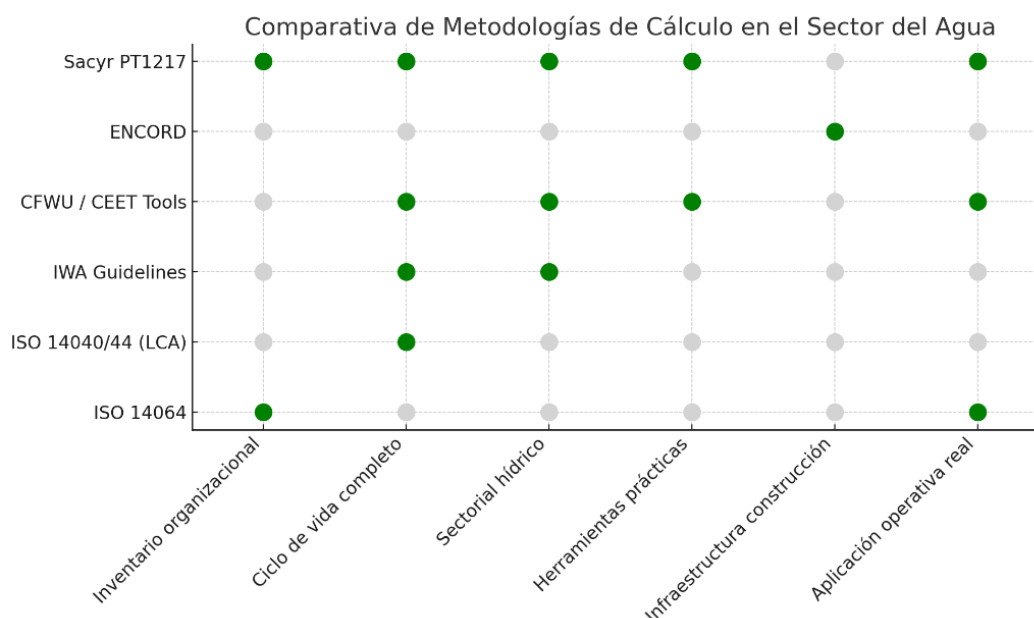
En el ámbito nacional, organismos como AEAS han impulsado el desarrollo de metodologías específicas y encuestas sectoriales que permiten homogeneizar la recogida de datos y evaluar las emisiones promedio del sector en España. Según su último informe, el 20% de las emisiones asociadas al ciclo del agua provienen del consumo eléctrico de las EDAR, mientras que el resto se reparte entre emisiones biológicas y actividades indirectas como transporte o mantenimiento [15]. Esta información sirve como base para orientar las inversiones en eficiencia energética y reducción de emisiones.

Una aportación destacada en el contexto europeo ha sido el protocolo ENCORD, desarrollado para evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub> en infraestructuras de construcción, incluyendo las hidráulicas. Este protocolo ha sido adaptado en diversas ocasiones por empresas de ingeniería y servicios públicos, como base para definir indicadores de sostenibilidad y priorizar medidas de mitigación [18]. Aunque no se trata de una metodología exclusiva del agua, su aplicación ha demostrado utilidad para evaluar proyectos de nuevas EDAR desde la fase de diseño.

Además, las recientes estrategias de monitorización en tiempo real han revolucionado la forma en que se cuantifican las emisiones en infraestructuras hídricas. Retema señala que el uso de sensores de gases, plataformas de datos y algoritmos de estimación ha mejorado la precisión de los cálculos y reducido la dependencia de factores de emisión genéricos [16]. Este avance permite, por ejemplo, estimar emisiones de N<sub>2</sub>O en función del perfil de carga de entrada a la EDAR o del rendimiento de las etapas de desnitrificación, lo que representa un cambio metodológico profundo respecto a estimaciones tradicionales.

es importante señalar que, en proyectos como el desarrollado por Sacyr en el contrato ESAMUR, se están aplicando metodologías híbridas que combinan inventarios organizacionales con herramientas de LCA. A partir de datos operativos reales de EDAR como Yecla, Raspay o Jumilla, se han desarrollado hojas de cálculo específicas basadas en el procedimiento interno de la empresa (PT1217), lo que ha permitido transformar datos estimados en resultados verificables con fines de auditoría [17]. Esta estrategia constituye un ejemplo valioso de cómo las metodologías pueden personalizarse en función del contexto y los recursos disponibles.

Figura. 12. Comparativa de Metodologías de Cálculo en el Sector del Agua



Fuente: Elaboración propia a partir de ISO 14064 [14], ISO 14040/44 [10], guías IWA [7], herramientas CFWU/CEET [2], protocolo ENCORD [18] y aplicación empresarial de Sacyr [17].

Una referencia técnica imprescindible en el ámbito del cálculo de la huella de carbono en el sector del agua son las guías elaboradas por la International Water Association (IWA). Esta organización ha liderado la creación de estándares técnicos y buenas prácticas para la sostenibilidad en el ciclo integral del agua, incluyendo recomendaciones metodológicas específicas para la cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI) en infraestructuras como EDAR y ETAP. La IWA ha promovido el uso del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) como marco base, con especial énfasis en la integración de emisiones directas ( $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ) provenientes de los procesos biológicos del tratamiento de aguas residuales [2].

Entre las publicaciones destacadas se encuentra el Manual "Carbon Footprint and Water Utilities", que establece un enfoque práctico para estimar emisiones en servicios de agua potable y saneamiento. Este documento propone indicadores sectoriales, unidades normalizadas de comparación ( $\text{kg CO}_2\text{eq/m}^3$  tratado) y factores de emisión adaptables al contexto operativo.

Además, introduce herramientas específicas como el CFWU (Carbon Footprint for Water Utilities Tool), diseñada para ser aplicada por operadores sin experiencia avanzada en modelización ambiental, facilitando así su adopción a escala global [7].

La IWA también ha contribuido con el desarrollo del modelo GHG Emissions Estimation Tool, el cual permite calcular de forma estructurada las emisiones de GEI a partir de parámetros como caudal, consumo energético, tipo de digestión, configuración de reactores y gestión de lodos. Esta herramienta ha sido validada en numerosos casos de estudio y es frecuentemente recomendada en auditorías de sostenibilidad y certificaciones ambientales en el sector hídrico [5]. Su enfoque modular permite adaptarse tanto a contextos de alta tecnología como a países en desarrollo, contribuyendo a la estandarización internacional de inventarios de emisiones.

Además de los estándares aplicables al ciclo de vida del agua, conviene destacar la relevancia del Protocolo de Medición de CO<sub>2</sub> en Construcción desarrollado por ENCORD (European Network of Construction Companies for Research and Development), particularmente en proyectos que implican el diseño, construcción o renovación de infraestructuras hidráulicas. Este protocolo se ha convertido en una herramienta ampliamente adoptada en el ámbito europeo para cuantificar de manera homogénea las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en proyectos constructivos [18].

El ENCORD CO<sub>2</sub> Protocol se centra en calcular las emisiones derivadas de materiales, transporte, maquinaria y procesos constructivos durante la fase de ejecución de infraestructuras. Aunque no está diseñado específicamente para plantas de tratamiento de agua, su aplicación resulta relevante cuando se consideran fases de construcción, ampliación o renovación de EDAR o ETAP, ya que permite estimar con precisión el impacto inicial del ciclo de vida (fase de cuna a puerta) [6]. De hecho, algunas versiones adaptadas del protocolo se han integrado en modelos híbridos de huella organizacional y de proyecto utilizados por empresas de ingeniería ambiental.

El valor añadido del enfoque ENCORD radica en su metodología abierta y compatible con LCA, al tiempo que permite el uso de factores de emisión específicos por país o fuente (e.g., ecoinvent, DEFRA, ADEME). Asimismo, establece criterios de trazabilidad, sistematización de inventarios y

verificación, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para auditorías de sostenibilidad en grandes proyectos públicos. En España, su aplicación ha sido incorporada por diversas constructoras en proyectos de saneamiento y abastecimiento hídrico, así como en contrataciones de organismos públicos que exigen compromisos de neutralidad climática [18].

La integración del protocolo ENCORD en proyectos de tratamiento de aguas residuales permite valorar no solo las emisiones operativas, sino también las derivadas de la infraestructura física, incluyendo el uso de hormigones, acero estructural, prefabricados, excavación y transporte. Esta información es especialmente útil para estimar el impacto inicial de proyectos en fase de diseño o para comparar soluciones constructivas más sostenibles. Cuando se combina con metodologías como ISO 14040/44 o el GHG Protocol, el enfoque ENCORD enriquece el análisis integral de huella de carbono.

En la práctica profesional, la selección de una metodología adecuada para el cálculo de la huella de carbono depende del tipo de proyecto, el nivel de profundidad requerido y el ciclo de vida considerado. A continuación, se presenta una tabla comparativa entre tres enfoques clave: la norma ISO 14064, centrada en la contabilidad organizacional de emisiones; el Protocolo ENCORD, aplicado a fases constructivas de infraestructuras; y las directrices sectoriales desarrolladas por la IWA, que integran el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) específico para el ciclo urbano del agua. Esta comparación permite visualizar las diferencias en cobertura, aplicabilidad y nivel de detalle, facilitando la elección metodológica según el contexto operativo del proyecto.

Tabla 4. Comparativa entre metodologías de cálculo de huella de carbono aplicadas a infraestructuras del agua

| <b>Criterio de comparación</b>  | <b>ISO 14064</b>                       | <b>ENCORD</b>               | <b>IWA / LCA sectorial</b> |
|---------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|
| Fase del ciclo de vida abordada | Operación (emisiones organizacionales) | Construcción (fase inicial) | Todo el ciclo de vida      |
| Aplicación                      | Cualquier sector                       | Sector                      | Ciclo urbano del agua      |

|                                   |                          |                                    |  |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|--|
| sectorial                         |                          | construcción/infraestructura       |  |
| Tipo de emisiones que cubre       | Alcances 1, 2 y 3        | Materiales, maquinaria, transporte | Todos los flujos relevantes            |
| Compatibilidad con LCA            | Media                    | Alta                               | Muy alta                               |
| Nivel de detalle                  | General                  | Alta                               | Alta                                   |
| Uso en infraestructura hidráulica | Moderado (cuando aplica) | Alta (obra nueva o reforma)        | Muy alta                               |
| Orientación práctica              | Alta                     | Alta                               | Moderada (requiere adaptación técnica) |

Fuente: Elaboración propia a partir de ISO 14064 [14], ENCORD Protocol [18], y directrices metodológicas de IWA [7].

### 3.4. Aplicación de la Huella de Carbono al tratamiento de aguas residuales

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) constituyen infraestructuras fundamentales para garantizar la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos, reducir la carga contaminante de los vertidos urbanos e industriales y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (Acción por el clima). Estas instalaciones permiten tratar grandes volúmenes de aguas residuales mediante procesos físicos, químicos y biológicos que eliminan sólidos, materia orgánica, nutrientes y patógenos antes de su devolución al medio natural o su reutilización.

El funcionamiento de una EDAR implica, sin embargo, un consumo significativo de recursos energéticos y la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estas emisiones provienen tanto de los procesos biológicos de tratamiento, como del consumo eléctrico de los sistemas de aireación, bombeo y desinfección, así como de actividades asociadas como la gestión de lodos, el transporte de residuos y el desplazamiento de trabajadores. Diversos estudios



destacan que, dependiendo de la tecnología y del mix energético del país, la huella de carbono de una EDAR puede oscilar entre 0,5 y 1,2 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> de agua tratada.

El impacto climático de las EDAR se analiza siguiendo la metodología del GHG Protocol y de normas como la ISO 14064-1:2018, que dividen las emisiones en tres alcances: Alcance 1 (emisiones directas de procesos propios como digestión anaerobia o nitrificación), Alcance 2 (emisiones indirectas por consumo de electricidad) y Alcance 3 (otras emisiones indirectas, como las asociadas a residuos, compras o transporte). Esta categorización permite identificar y gestionar de forma diferenciada las fuentes de emisión más relevantes en cada instalación.

Desde una perspectiva de ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA), las EDAR modernas incorporan fases que incluyen: pretratamiento (cribado, desarenado), tratamiento primario (decantación), tratamiento secundario (procesos biológicos como lodos activados), tratamiento terciario (filtración, desinfección) y gestión de subproductos (lodos, arenas, tamices). Cada una de estas fases presenta perfiles de consumo energético y de generación de emisiones específicos.

Uno de los principales retos en la evaluación de la huella de carbono de las EDAR radica en la inclusión adecuada de las emisiones indirectas del Alcance 3, tradicionalmente subestimadas por la dificultad de obtener datos primarios fiables. Estas emisiones pueden representar entre un 20 % y un 40 % de la huella total de una instalación, especialmente en aquellas que recurren intensivamente a productos químicos, transporte de residuos o mantenimiento externo.

El tratamiento de los subproductos, en particular los lodos de depuración, constituye un componente crítico del impacto climático de las EDAR. Según estudios recientes, la elección del destino de los lodos (compostaje, valorización energética, incineración o vertido) puede modificar sustancialmente la huella de carbono final de la instalación. Asimismo, el transporte asociado a la gestión de residuos y al commuting del personal contribuye de manera significativa al perfil de emisiones, en especial en plantas ubicadas en áreas rurales.

Con el avance de tecnologías de tratamiento terciario, como la ultrafiltración, la ozonización o la desinfección ultravioleta, las EDAR han incrementado sus exigencias energéticas, elevando la

proporción de emisiones del Alcance 2. Esta tendencia refuerza la necesidad de integrar fuentes de energía renovable, estrategias de eficiencia energética y sistemas de recuperación de biogás para compensar el impacto ambiental.

Desde una perspectiva regulatoria, las EDAR deben cumplir con normativas como la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, además de normativas nacionales y autonómicas que imponen requisitos de calidad del efluente y de control de emisiones. Estas exigencias normativas impulsan a las empresas operadoras a integrar la gestión de la huella de carbono dentro de sus sistemas de gestión ambiental y sus informes de sostenibilidad.

La creciente presión social y empresarial hacia la descarbonización de las infraestructuras hídricas ha llevado al desarrollo de programas voluntarios, como el Registro de Huella de Carbono, Compensación y Proyectos de Absorción del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en España. Estos programas promueven la medición, reducción y compensación de las emisiones de GEI en las EDAR y otros servicios públicos críticos.

El contrato ESAMUR – Lote 9, gestionado por Sacyr Agua, abarca tres estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) situadas en el Altiplano murciano: Yecla, Jumilla y Raspay. Estas instalaciones representan un caso representativo para la evaluación de emisiones indirectas de Alcance 3, debido a su diversidad tecnológica, escala de operación y disponibilidad de datos operativos actualizados.

Las tres EDAR tienen capacidad de tratamiento biológico con aireación prolongada, digestión de lodos y tratamiento terciario mediante desinfección UV o hipoclorito, y en el caso de Yecla, una planta piloto con ozono en fase de pruebas. Estas condiciones permiten evaluar una gama amplia de fuentes de emisión que incluyen: procesos biológicos (Alcance 1), consumo eléctrico (Alcance 2) y actividades logísticas, mantenimiento y servicios subcontratados (Alcance 3). A continuación se presenta un resumen técnico de las instalaciones incluidas:

Tabla 5. Límites operacionales por planta – Contrato ESAMUR

| Instalación      | Control operativo | Alcances incluidos                    | Exclusiones específicas          |
|------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| EDAR Yecla       | Sí                | Alcances 1, 2, 3 (Categorías 1, 5, 7) | Planta de ozono experimental     |
| EDAR Jumilla     | Sí                | Alcances 1, 2, 3 (Categorías 1, 5, 7) | Subproductos con gestión externa |
| EDAR Raspay      | Sí                | Alcances 2 y 3 (estimación indirecta) | Falta de datos primarios         |
| EBAR Las Teresas | Sí                | Alcances 2 y 3 (Categoría 7)          | No hay tratamiento biológico     |

Fuente: Elaboración propia a partir de Contrato ESAMUR

Para el desarrollo del inventario de emisiones se ha seguido un enfoque de control operacional, conforme a ISO 14064-1 y el GHG Protocol, priorizando la utilización de datos primarios: facturación de mantenimiento, registros de residuos, encuestas de desplazamiento y ratios específicos para cada EDAR. Las emisiones indirectas han sido desglosadas según las siguientes categorías clave del Alcance 3:

Tabla 6. Aplicación de Alcance 3 en las plantas del contrato ESAMUR

| Categoría (GHG Protocol) | Actividad en EDAR ESAMUR                           | Fuente de datos                 | Factor de emisión                        | Emisiones estimadas       |
|--------------------------|--|---------------------------------|--|---------------------------|
| 1. Bienes y servicios    | Subcontratas de mantenimiento técnico              | Excel subcontratas, gasto anual | 0,32 kg CO <sub>2</sub> e/€ (DEFRA 2023) | En desarrollo             |
| 5. Residuos operativos   | Lodos, tamices y arenas a valorización o vertedero | Informe PRTR, datos planta      | 45–135 kg CO <sub>2</sub> e/t            | >180 t CO <sub>2</sub> e  |
| 7. Desplazamientos       | Movilidad diaria del personal                      | Encuesta interna                | 0,18–0,26 kg CO <sub>2</sub> e/km        | 15–20 t CO <sub>2</sub> e |

Fuente: Elaboración propia a partir de Contrato ESAMUR

Este caso de estudio permite identificar tres aspectos clave:

1. Fiabilidad del inventario: gracias al uso de datos reales de cada planta, se reduce la incertidumbre y se aumenta la validez de los cálculos.
2. Replicabilidad: se ha diseñado una hoja Excel con módulos adaptables a cada categoría de emisión, ajustada al contrato ESAMUR.
3. Transferencia de conocimiento: los resultados son extrapolables a otras instalaciones del grupo, cumpliendo los requisitos de trazabilidad de la ISO 14064-1.

En suma, el análisis del contrato ESAMUR aporta una perspectiva integral y aplicada sobre la huella de carbono en EDAR, que permite avanzar en la incorporación sistemática de las emisiones de Alcance 3 como parte esencial del desempeño ambiental de las infraestructuras hídricas.

La evaluación de la huella de carbono en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) ha evolucionado considerablemente en la última década, impulsada por la necesidad de mejorar la sostenibilidad en el sector del agua. A nivel internacional, diversos estudios han documentado los perfiles de emisiones de plantas de tratamiento bajo diferentes configuraciones tecnológicas y contextos geográficos.

Un primer caso destacado es el de la EDAR urbana en Australia, analizada por Foley et al., que combina tratamiento biológico, terciario y desinfección, con una huella de carbono de aproximadamente 0,72 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> tratado. En esta instalación, el Alcance 1 representa el 48 % de las emisiones totales, destacando la importancia de los procesos biológicos en el balance de gases de efecto invernadero.

En España, Corominas et al. estudiaron una EDAR terciaria equipada con procesos de secundario, tratamiento UV y ozonización, alcanzando una huella de carbono de 0,85 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>. En este caso,

el Alcance 2 (emisiones por electricidad) fue particularmente relevante, representando el 39 % del total, debido al elevado consumo energético asociado a los procesos terciarios.

Otra referencia es la EDAR rural de Murcia, bajo el contrato ESAMUR gestionado por Sacyr, que integra biológico convencional, digestión anaerobia y tratamiento UV. El análisis preliminar ha mostrado una huella base de 0,68 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>, con una distribución equilibrada entre los Alcances 1 (41 %), 2 (33 %) y 3 (26 %).

En el ámbito de la reutilización, Pasqualino et al. documentaron una EDAR destinada a riego agrícola en Cataluña, logrando una huella de 0,63 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> tratado. Gracias a la integración de usos finales sostenibles, el Alcance 3 (emisiones indirectas) alcanzó un 31 % del total, subrayando la importancia de la gestión del agua reciclada.

En Noruega, Venkatesh y Brattebø evaluaron una EDAR urbana con tratamiento mediante lodos activos y cogeneración de calor, registrando una huella de carbono de 0,59 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>. Esta configuración destaca por la elevada recuperación energética, que reduce significativamente las emisiones netas. La siguiente tabla sintetiza la comparación entre los principales estudios:

Tabla 7. comparación entre los principales estudios

| EDAR                         | Configuración tecnológica            | Huella total (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) | % Alcance 1 | % Alcance 2 | % Alcance 3 | Fuente                    |
|------------------------------|--------------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| Urbana (Australia)           | Biológico terciario + desinfección   | 0,72  | 48 %        | 36 %        | 16 %        | Foley et al. [1]          |
| Terciaria (España)           | Secundario + UV + ozono              | 0,85  | 42 %        | 39 %        | 19 %        | Corominas et al. [2]      |
| Rural (Murcia - ESAMUR)      | Biológico + digestión anaerobia + UV | 0,68  | 41 %        | 33 %        | 26 %        | TFM presente              |
| Con reutilización (Cataluña) | Biológico terciario + riego agrícola | 0,63  | 39 %        | 30 %        | 31 %        | Pasqualino et al. [10]    |
| Urbana (Noruega)             | Lodos activos + cogeneración         | 0,59  | 35 %        | 28 %        | 37 %        | Venkatesh y Brattebø [13] |

Fuente: Elaboración propia basada en Foley et al. [1], Corominas et al. [2], Pasqualino et al. [10], Venkatesh y Brattebø [13], y datos Sacyr

La aplicación de metodologías de huella de carbono en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) ha sido ampliamente desarrollada en las dos últimas décadas, particularmente a raíz de la evolución normativa y del interés institucional por cuantificar impactos ambientales en infraestructuras críticas. A pesar de ello, la variabilidad tecnológica, la disponibilidad de datos y las condiciones operativas locales han generado diferencias sustanciales entre estudios, lo que hace necesario revisar comparativamente los enfoques aplicados.

Estudios como los de Foley et al. [1], Corominas et al. [2] y Rodríguez-García et al. [5] han sido pioneros en analizar el perfil de emisiones de distintas configuraciones de EDAR bajo modelos de análisis de ciclo de vida (LCA). Estas investigaciones destacan que el Alcance 1, asociado a emisiones biogénicas ( $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ ), representa una proporción significativa, especialmente en instalaciones con digestión anaerobia o procesos avanzados de tratamiento. No obstante, también se reconoce que el Alcance 3, muchas veces subestimado, puede alcanzar entre un 25 % y un 35 % de la huella total.

En el caso de las EDAR españolas, algunas experiencias relevantes son las llevadas a cabo por Aquavall [17], en Valladolid, donde el commuting de empleados y el tratamiento de residuos fueron categorizados dentro del Alcance 3 con resultados representativos; o por Sacyr Agua, cuyo contrato en Murcia (Yecla, Jumilla, Raspay) ha sido empleado como caso real en el presente trabajo. Estos ejemplos coinciden en la necesidad de emplear datos primarios y factores de emisión actualizados, preferiblemente mediante herramientas de cálculo replicables como hojas Excel estructuradas.

Comparativamente, las EDAR con tratamiento terciario tienden a presentar mayores emisiones indirectas debido al uso intensivo de productos químicos, electricidad y tecnología especializada. Además, las EDAR urbanas suelen tener menor peso relativo del transporte del personal, mientras que en zonas rurales o dispersas, como en el caso del Altiplano murciano, el commuting representa una fuente relevante que no puede ignorarse en el análisis de Alcance 3; la siguiente tabla sintetiza

varios casos reales analizados en la literatura y en estudios técnicos recientes, contrastando sus principales características técnicas, metodológicas y resultados obtenidos en términos de huella de carbono total y distribución por alcances:

Tabla 8 Comparativa de aplicación de huella de carbono en EDAR (casos reales)

| EDAR                        | Configuración tecnológica            | Año  | Huella total (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) | % Alcance 1 | % Alcance 2 | % Alcance 3 | Fuente                    |
|-----------------------------|--------------------------------------|------|---|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| EDAR urbana (Australia)     | Biológico terciario + desinfección   | 2010 | 0,72  | 48 %        | 36 %        | 16 %        | Foley et al. [1]          |
| EDAR terciaria (España)     | Secundario UV + ozono                | 2013 | 0,85  | 42 %        | 39 %        | 19 %        | Corominas et al. [2]      |
| EDAR rural (Murcia, ESAMUR) | Biológico digestión anaerobia UV     | 2024 | 0,68 (estimación base)                              | 41 %        | 33 %        | 26 %        | TFM presente, datos Sacyr |
| EDAR con reutilización      | Biológico terciario + riego agrícola | 2011 | 0,63  | 39 %        | 30 %        | 31 %        | Pasqualino et al. [10]    |
| EDAR urbana (Noruega)       | Lodos activos + calor cogenerado     | 2011 | 0,59  | 35 %        | 28 %        | 37 %        | Venkatesh y Brattebø [13] |

Fuente: Elaboración propia a partir de [1], [2], [5], [10], [13] y datos del caso ESAMUR–Sacyr (2024).

### 3.4.1 Principales emisiones en EDAR (Alcances 1, 2 y 3)

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) representan una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), debido a la combinación de procesos biológicos intensivos, consumo energético elevado y actividades indirectas relacionadas con el mantenimiento, la gestión de residuos y el transporte. La cuantificación de estas emisiones se estructura habitualmente en tres categorías conforme a la metodología del GHG Protocol: Alcance 1 (emisiones directas), Alcance 2 (emisiones indirectas por consumo de energía eléctrica) y Alcance 3 (otras emisiones indirectas asociadas a la cadena de valor) [14].

En el Alcance 1, las principales emisiones provienen de los procesos biológicos que se llevan a cabo durante el tratamiento del agua. La digestión anaerobia y los procesos de nitrificación y desnitrificación generan metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), dos gases con un potencial de calentamiento global (GWP) mucho mayor que el del dióxido de carbono (25 y 298 veces respectivamente) [5]. Estudios como el de Rodríguez-García et al. han demostrado que en EDAR con digestores y tratamiento de lodos, las emisiones biológicas pueden superar el 50% del total de la huella de carbono de la planta [5].

El Alcance 2 está compuesto por las emisiones indirectas derivadas del consumo de energía eléctrica, especialmente en sistemas de aireación, bombeo y tratamiento terciario. Según datos de la AEAS, aproximadamente el 70% del consumo energético de una EDAR se destina a la aireación prolongada, necesaria para mantener los procesos de tratamiento biológico [15]. Estas emisiones, aunque indirectas, pueden representar hasta un tercio del total, dependiendo de la fuente de generación eléctrica utilizada (renovable o fósil). Por tanto, la eficiencia energética y el origen de la electricidad son variables críticas en el cálculo de la huella de carbono en este alcance.

El Alcance 3, frecuentemente subestimado, incluye las emisiones derivadas de actividades como la gestión de residuos (Categoría 5), el desplazamiento del personal (Categoría 7) y el mantenimiento o adquisición de bienes y servicios (parte de la Categoría 1). Estas emisiones, aunque más difíciles de cuantificar, pueden ser relevantes: los residuos como tamices, arenas y lodos deshidratados tratados fuera del sitio pueden generar emisiones en transporte, valorización o vertido, mientras que los desplazamientos diarios de trabajadores suponen una carga significativa si se realizan en vehículos individuales de combustión [19].

Para una EDAR típica, la distribución estimada de emisiones puede situarse en un 40% para el Alcance 1, 35% para el Alcance 2, y 25% para el Alcance 3, aunque estas proporciones varían en función del tamaño de la instalación, la tecnología empleada y los hábitos operativos [2], [7]. En plantas que utilizan digestión anaerobia con aprovechamiento de biogás o que operan con electricidad renovable, el peso relativo de las emisiones en el Alcance 2 tiende a disminuir, aumentando la importancia de los procesos biológicos y del control de fugas.



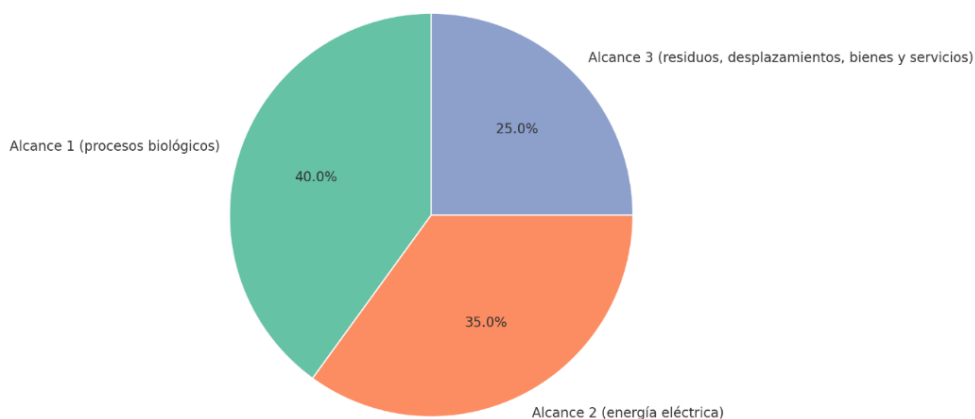
Además, la gestión de lodos es una fuente de impacto especialmente crítica. El transporte, tratamiento externo y disposición de lodos puede contribuir significativamente al Alcance 3, particularmente si los residuos se destinan a vertedero en lugar de valorización. Según el estudio de Garrido-Baserba et al; la elección de una alternativa de tratamiento más sostenible puede reducir hasta en un 30% las emisiones totales de la planta [3].

En cuanto al transporte de personal, un estudio de Aquavall mostró que el commuting del personal técnico representaba un 6-10% de la huella total anual, dependiendo del número de empleados, turnos y distancia al centro de trabajo [17]. Estas emisiones pueden mitigarse mediante estrategias de movilidad sostenible (vehículos eléctricos, rutas compartidas, incentivos para transporte público), pero requieren ser correctamente incluidas en el inventario de emisiones para ser gestionadas.

Por último, el uso de productos químicos como hipoclorito, coagulantes o polímeros también genera emisiones indirectas considerables en el Alcance 3. Estas emisiones se calculan a partir del análisis de factores de emisión secundarios (como los de ecoinvent o DEFRA) y pueden representar hasta el 15% del total, especialmente en plantas que hacen uso intensivo de tratamiento terciario con desinfección química [19]. Su evaluación detallada es indispensable para optimizar las compras y evaluar proveedores desde el enfoque de sostenibilidad.

Figura. 13. Distribución Estimada de Emisiones en una EDAR por Alcance

Distribución Estimada de Emisiones en una EDAR por Alcance



Fuente: Elaboración propia basada en estimaciones de Corominas et al. [2], Rodríguez-García et al. [5], y datos de AEAS [15].

En el tratamiento de aguas residuales urbanas, las emisiones de gases de efecto invernadero se originan en distintas etapas del proceso, y pueden clasificarse en función del tipo de fenómeno que las genera: procesos biológicos, consumo energético, y gestión de subproductos y residuos. Esta diferenciación permite comprender con mayor precisión el perfil de emisiones de una EDAR y aplicar metodologías de cálculo ajustadas a cada caso.

Las emisiones de proceso son aquellas que se producen por la propia actividad biológica de los microorganismos involucrados en la depuración del agua. En especial, destacan dos gases: el metano ( $\text{CH}_4$ ), generado bajo condiciones anaerobias (típicas de la digestión de lodos o zonas de baja oxigenación), y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), producido en fases de nitrificación y desnitrificación. Ambos gases son de origen biogénico, pero poseen un potencial de calentamiento global (GWP) muy superior al  $\text{CO}_2$ : 25 veces en el caso del  $\text{CH}_4$  y 298 veces para el  $\text{N}_2\text{O}$ , lo que los convierte en responsables de una parte sustancial del impacto climático de las EDAR [5], [2].

Otra fuente significativa de emisiones es el consumo eléctrico, que suele estar vinculado al funcionamiento de sistemas como la aireación prolongada, el bombeo y el tratamiento terciario. La

aireación, por sí sola, puede consumir más del 50–70% de la energía total de la planta, convirtiéndose en el mayor contribuyente al Alcance 2. Aunque estas emisiones no se producen físicamente en la instalación, se contabilizan como indirectas por su dependencia del suministro eléctrico, cuya huella de carbono depende del mix energético nacional [15].

Los subproductos generados en la depuración, especialmente lodos, arenas y residuos sólidos cribados, también son relevantes desde una perspectiva ambiental. El tratamiento y disposición final de estos materiales —ya sea por transporte a vertederos, incineración, valorización energética o aplicación agrícola— conlleva emisiones que deben incluirse en el Alcance 3, concretamente en la Categoría 5 (residuos generados en operaciones). Estas emisiones pueden ser particularmente elevadas si el tratamiento de lodos implica procesos externos intensivos en energía o transporte a larga distancia [3], [17].

Adicionalmente, se deben considerar las emisiones asociadas a productos químicos utilizados en el tratamiento, como hipoclorito, coagulantes o polímeros, cuya fabricación y transporte generan emisiones indirectas. Estas se recogen en el Alcance 3, Categoría 1 (bienes y servicios adquiridos) y requieren el uso de factores de emisión específicos para cada reactivo, disponibles en bases de datos como ecoinvent o DEFRA [19]. La inclusión de estos datos aporta robustez y precisión al inventario global.

Los servicios auxiliares y el transporte de personal también deben ser contemplados. El desplazamiento diario de operarios, técnicos o personal externo (laboratorios, mantenimiento, etc.) genera emisiones que, aunque modestas en volumen, forman parte del perfil completo de la instalación, y son reportadas bajo el Alcance 3, Categoría 7 (commuting). Su estimación puede realizarse mediante encuestas de movilidad y uso de factores de emisión por kilómetro recorrido [17].

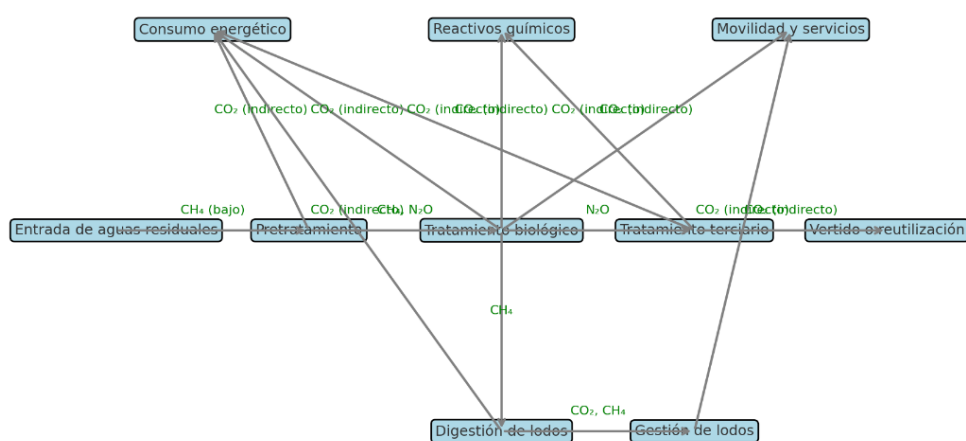
Tabla 9. Tipología de emisiones en una EDAR según origen y alcance

| Origen de la emisión              | Gas predominante   | Proceso asociado  | Alcance                   |
|-----------------------------------|--|---|---------------------------|
| Emisiones de proceso biogénico    | CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O                               | Digestión anaerobia, nitrificación/desnitrificación     | Alcance 1                 |
| Consumo energético                | CO <sub>2</sub> (indirecto)                                      | Aireación, bombeo, desinfección, terciario              | Alcance 2                 |
| Subproductos y lodos              | CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O (indirecto) | Transporte y tratamiento externo de lodos/residuos      | Alcance 3 – Categoría 5   |
| Reactivos químicos                | CO <sub>2</sub> (indirecto)                                      | Producción y transporte de hipoclorito, polímeros, etc. | Alcance 3 – Categoría 1   |
| Transporte y servicios auxiliares | CO <sub>2</sub> (indirecto)                                      | Desplazamiento de personal, visitas técnicas, contratos | Alcance 3 – Categoría 7/8 |

Fuente: Elaboración propia a partir de [2], [3], [5], [15], [17], [19].

Figura. 14. Diagrama de flujo de emisiones en una EDAR según fase del proceso

Diagrama de Flujo de Emisiones en una EDAR según Fase del Proceso



Fuente: Elaboración propia a partir de [2], [5], [15], [17], [19].

En el contexto de las EDAR, el Alcance 3 del inventario de gases de efecto invernadero engloba aquellas emisiones indirectas que no son generadas directamente por la instalación, pero que están asociadas a actividades necesarias para su funcionamiento. Aunque durante años este alcance fue subestimado por su complejidad metodológica, hoy se reconoce que puede representar hasta un 25–35% de la huella total de una EDAR, especialmente en instalaciones de mediana y gran escala [2].

Una de las fuentes más significativas en el Alcance 3 es la gestión de residuos generados durante la operación, en particular los lodos deshidratados, tamices y arenas provenientes de los procesos de cribado, desarenado y tratamiento biológico. Estas fracciones deben ser transportadas y tratadas externamente, ya sea mediante valorización energética, compostaje, incineración o depósito en vertedero, cada una con un perfil de emisiones asociado. Por ejemplo, si los lodos se trasladan largas distancias o son destinados a vertedero sin tratamiento, las emisiones derivadas del transporte y la liberación de metano pueden ser sustanciales [5], [15].

Otra fuente crítica es el desplazamiento del personal (commuting), correspondiente a la Categoría 7 del Alcance 3, especialmente en instalaciones con turnos rotativos, personal externo recurrente o contratistas. En EDAR ubicadas en zonas industriales o rurales, el uso de vehículos particulares con motor de combustión para llegar a las plantas es habitual, lo que convierte esta categoría en un foco de emisiones relevante. Aquavall, por ejemplo, ha estimado que este tipo de desplazamientos puede representar entre el 6% y el 10% de la huella total de la planta, dependiendo de la distribución del personal y las distancias recorridas [17].

El mantenimiento de equipos y las compras asociadas a bienes y servicios —parte de la Categoría 1 del Alcance 3— también constituye una fuente de emisiones relevante. Aunque a menudo se calcula a partir de datos secundarios (como facturación anual o promedios de emisiones por unidad de gasto), el impacto ambiental de actividades como el reemplazo de soplantes, motores, bombas, piezas de automatización o sistemas de control puede ser elevado, especialmente si se considera el ciclo completo de fabricación y transporte de estos equipos [19]. Estas emisiones pueden estimarse utilizando factores de emisión de bases como ecoinvent o DEFRA.

También se incluyen en el Alcance 3 las emisiones asociadas a servicios contratados externamente, como análisis de laboratorio, auditorías técnicas, limpieza industrial o vigilancia. Aunque individualmente puedan parecer menores, su acumulación —especialmente en instalaciones con múltiples unidades— aporta consistencia al inventario de emisiones y mejora la trazabilidad en auditorías de sostenibilidad ambiental [15].

La identificación y cuantificación precisa de estas fuentes exige la integración de datos operativos, logísticos y financieros, además de la colaboración con proveedores y subcontratistas. La aplicación de cuestionarios estructurados, fichas de movilidad y análisis de facturación son algunas de las estrategias recomendadas para capturar esta información de forma coherente con el enfoque del GHG Protocol y los requisitos de la ISO 14064-1 [2].

Incluir estas categorías en el análisis no solo mejora la integridad del inventario de GEI, sino que también permite identificar oportunidades de mejora en ámbitos transversales: optimización de rutas de transporte, contratación de proveedores locales, electrificación de la movilidad laboral, reducción de residuos generados o selección de materiales de bajo impacto. En consecuencia, el Alcance 3 deja de ser un complemento metodológico para convertirse en un eje estratégico en la gestión sostenible de infraestructuras hídricas.

Tabla 10. Principales categorías del Alcance 3 en EDAR: ejemplos y estrategias de reducción

| <b>Categoría (GHG Protocol)</b>      | <b>Ejemplo en EDAR</b>                                      | <b>Tipo de emisión</b>                                   | <b>Estrategias de reducción</b>  |
|--------------------------------------|---|--|--|
| 1. Bienes y servicios adquiridos     | Compra de bombas, reactores, sistemas de control, reactivos | Emisiones indirectas por fabricación y transporte        | Compras circulares, proveedores de baja huella, estandarización de repuestos |
| 5. Residuos generados en operaciones | Lodos, tamices, arenas enviados a vertedero o valorización  | Emisiones en tratamiento, transporte y disposición final | Reducción en origen, digestión avanzada, acuerdos con gestores sostenibles   |
| 7. Desplazamiento                    | Viajes diarios del  | Emisiones del  | Transporte compartido,   |

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| de empleados                            | personal técnico y de operadores                    | transporte (CO <sub>2</sub> )                             | incentivos a movilidad eléctrica o transporte público                    |
| 8. Uso de servicios subcontratados      | Laboratorios, auditorías, vigilancia, mantenimiento | Emisiones por prestación del servicio (CO <sub>2</sub> )  | Contratación con criterios ambientales, evaluación del ciclo de servicio |
| 9. Transporte y distribución (upstream) | Transporte de productos químicos desde proveedores  | Emisiones logísticas (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> ) | Optimización de rutas, compras agrupadas, contratación local             |

Fuente: Elaboración propia basada en [2], [5], [15], [17], [19].

### 3.4.2 Estado del arte y benchmark comparativo en EDAR

El estudio de la huella de carbono en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) ha evolucionado en las dos últimas décadas como una necesidad operativa, normativa y científica para mejorar la sostenibilidad del ciclo urbano del agua. Diversos trabajos internacionales han aplicado metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), el GHG Protocol y las normas ISO 14064 e ISO 14067 para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de estas instalaciones [1], [2]. El benchmarking comparativo permite establecer referencias sectoriales, detectar oportunidades de mejora y validar metodologías frente a realidades técnicas diversas.

Uno de los estudios pioneros es el de Foley et al., quienes aplicaron LCA a cinco configuraciones tecnológicas de EDAR en Australia. Concluyeron que los procesos biológicos dominan las emisiones de Alcance 1 (CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) y que el tratamiento terciario puede incrementar considerablemente el Alcance 2 por su elevada demanda energética [1]. Posteriormente, Corominas et al. analizaron más de 100 EDAR en Europa, demostrando que las emisiones totales oscilaban entre 0,5 y 1,2 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> dependiendo del sistema de tratamiento y la fuente de electricidad [2].

En cuanto al Alcance 3, Rodríguez-García et al. propusieron una metodología específica para incluir los residuos, transporte de insumos y desplazamientos de personal en los inventarios, destacando que estos pueden representar hasta el 30 % del total en EDAR urbanas con contratos de mantenimiento y alta dependencia de reactivos externos [3]. La inclusión del commuting fue

abordada por Gallego-Schmid et al., quienes evaluaron este aspecto en instalaciones descentralizadas, proponiendo factores regionales por tipo de vehículo [4].

La siguiente tabla presenta una comparativa representativa de estudios que han aplicado benchmarking de huella de carbono a EDAR, diferenciando entre Alcance 1, 2 y 3:

Tabla 11. comparativa representativa de estudios

| EDAR                          | Configuración         | Huella (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) | Alcance 1 | Alcance 2 | Alcance 3 | Fuente           |
|-------------------------------|-----------------------|---|-----------|-----------|-----------|------------------|
| EDAR Australia (urbana)       | Biol.+terciario+UV    | 0,72  | 48 %      | 36 %      | 16 %      | Foley et al. [1] |
| EDAR España (terciario+ozono) | Secundario + ozono    | 0,85  | 42 %      | 39 %      | 19 %      | Corominas [2]    |
| EDAR Noruega (cogeneración)   | Biol.+cogeneración    | 0,59  | 35 %      | 28 %      | 37 %      | Venkatesh [5]    |
| EDAR reutilización (Cataluña) | Biol.+terciario+riego | 0,63  | 39 %      | 30 %      | 31 %      | Pasqualino [6]   |

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados reflejan la importancia de adaptar los sistemas de límites del estudio a la realidad operativa de cada planta. En el caso de EDAR con tratamiento terciario (ozono, UV o filtración), la contribución del Alcance 2 tiende a aumentar si la electricidad no proviene de fuentes renovables [2]; por su parte, el Alcance 3 es extremadamente sensible al tipo de gestión de lodos. Garrido-Baserba et al. concluyeron que el destino final (vertido, valorización, incineración) modifica en más de un 25 % la huella total del proceso [7]. Las plantas que implementan digestores anaerobios con cogeneración muestran ventajas netas en Alcance 1 al reducir la emisión neta de metano gracias a la valorización del biogás [5]; otro elemento crítico es la procedencia de los insumos. Venkatesh y Brattebø estimaron que el transporte y fabricación de reactivos como hipoclorito, sulfato férrico y coagulantes pueden representar hasta un 12 % de las emisiones totales si se considera su ciclo de vida completo [5]. Esta proporción se incrementa en EDAR con terciario químico.



Desde el punto de vista metodológico, la base de datos DEFRA se ha usado ampliamente por su actualización anual y aplicabilidad corporativa [8]. Sin embargo, ecoinvent ofrece mayor resolución para modelar equipamiento específico (membranas, soplantes, UV) y materiales, siendo preferida en estudios de ciclo de vida detallado [9]; una comparativa metodológica entre DEFRA y ecoinvent realizada por Pasqualino et al. identificó diferencias de hasta el 18 % en la huella final al evaluar transporte y tratamiento de residuos químicos, debido a la granularidad de datos de cada base [6]; el estudio de Sweetapple et al. incorporó modelos de optimización de aireación en tiempo real, demostrando que el ajuste operativo puede reducir en un 20 % las emisiones del Alcance 2 sin modificar la calidad del efluente, lo que abre la puerta a estrategias de mitigación directas [10].

A nivel comparativo, los estudios muestran que las EDAR con reutilización del agua tratada y cogeneración presentan los perfiles más eficientes en términos de huella total, mientras que las que dependen de electricidad de origen fósil y transportan residuos a largas distancias tienden a tener huellas superiores [1], [2], [5]; el commuting o desplazamiento de empleados, aunque frecuentemente excluido, ha sido incluido en varios estudios recientes con una contribución media del 5-8 % de la huella total, especialmente en plantas periurbanas con escasa conectividad pública [4], [11]; las EDAR descentralizadas en zonas rurales de América Latina, como las evaluadas por Gallego-Schmid et al., presentan perfiles de Alcance 3 muy elevados (hasta 40 %) por la alta dependencia de insumos externos y servicios subcontratados [4]; a escala global, la IWA ha propuesto la unificación de indicadores para benchmarking sectorial y ha promovido el uso de ratios como kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> tratado, CO<sub>2</sub>e/kg DBO eliminado y CO<sub>2</sub>e/kWh consumido para facilitar la comparabilidad [12].

### **3.4.3 Revisión de estudios y artículos científicos en EDAR**

El análisis de la huella de carbono en plantas de tratamiento de aguas residuales ha sido ampliamente explorado en la literatura científica, especialmente en contextos donde las instalaciones incorporan tecnologías avanzadas como tratamiento terciario, digestión anaerobia, reutilización del efluente, o valorización de lodos. Estos estudios han permitido validar metodologías de medición, comparar escenarios operativos y cuantificar el impacto de decisiones

técnicas sobre la sostenibilidad ambiental de las EDAR; uno de los estudios pioneros fue el de Foley et al. [1], quienes realizaron un inventario completo de ciclo de vida en distintas configuraciones de EDAR, incluyendo aquellas con tratamiento terciario mediante filtración y desinfección. El estudio evidenció que los procesos de aireación y consumo eléctrico dominaban el perfil de emisiones, pero que las tecnologías terciarias, como la filtración con arena y el uso de UV, también generaban un impacto significativo en el Alcance 2 debido a su alta demanda energética; Corominas et al. [2], por su parte, revisaron más de 100 artículos sobre LCA aplicado al tratamiento de aguas residuales, destacando la necesidad de estandarizar factores de emisión, sistemas de límites y métodos de comparación. Su análisis incluyó EDAR con tratamientos avanzados, como membranas de ultrafiltración y sistemas de ozonización, observando que, si bien estas tecnologías mejoraban la calidad del efluente, también aumentaban la huella de carbono si no iban acompañadas de fuentes energéticas renovables.

En el contexto de la gestión de lodos, Garrido-Baserba et al. [3] utilizaron herramientas de soporte a la decisión ambiental para seleccionar tecnologías de tratamiento, incluyendo la digestión anaerobia con cogeneración y la incineración. Aplicaron un enfoque de LCA para comparar escenarios, concluyendo que la cogeneración con biogás reducía significativamente la huella de carbono frente a la incineración directa, siempre que el sistema permitiera valorizar el calor y la electricidad producidos; un enfoque más dinámico fue presentado por Sweetapple et al. [4], quienes integraron la optimización del control operativo en tiempo real para minimizar emisiones de  $N_2O$  y consumo energético. Utilizando modelos de simulación, demostraron que pequeñas modificaciones en la estrategia de aireación y recirculación podían reducir las emisiones hasta en un 20% sin comprometer el rendimiento de depuración. Esto resulta especialmente aplicable a EDAR con tratamiento terciario, donde las exigencias de calidad del efluente obligan a operar en condiciones de alta carga energética.

En cuanto a la caracterización de gases específicos, Rodríguez-García et al. [5] propusieron una metodología para estimar emisiones de GEI en LCA de EDAR, con énfasis en la inclusión de emisiones biogénicas no contabilizadas habitualmente. Aplicaron su método a una planta con tratamiento secundario extendido y terciario mediante cloración, y concluyeron que las emisiones

de  $N_2O$  estaban subestimadas en muchos inventarios previos, representando hasta el 40% del total si se incluían correctamente; en contextos urbanos de países en desarrollo, Gallego-Schmid et al. [7] revisaron tecnologías de tratamiento descentralizado y su impacto climático, con especial atención a las emisiones del Alcance 3 (compra de productos químicos y transporte de residuos). Encontraron que las plataformas modulares de tratamiento con filtros biológicos y UV podían ser ambientalmente competitivas si se optimizaban las rutas logísticas y se reducían las dosis de reactivos.

Otros estudios, como el de Pasqualino et al. [10], se centraron en la reutilización del agua tratada para riego agrícola, utilizando un enfoque de LCA comparativo. Evaluaron distintos escenarios en EDAR catalanas y mostraron que el impacto en huella de carbono se reducía considerablemente cuando el tratamiento terciario se destinaba a reutilización directa, desplazando así otras fuentes de agua más intensivas en emisiones como la desalinización o el bombeo de aguas subterráneas; Tangsubkul et al. [12] analizaron procesos de microfiltración aplicados en EDAR terciarias, y demostraron que el tipo de membrana, su frecuencia de sustitución y el nivel de pretratamiento condicionaban el impacto ambiental del proceso. En sistemas bien diseñados y con recuperación energética, la microfiltración podía competir con otros procesos terciarios clásicos en términos de eficiencia y emisiones.

En los estudios sobre huella de carbono en EDAR, uno de los elementos que más influye en los resultados finales del inventario de emisiones es la selección de factores de emisión, es decir, los coeficientes que permiten convertir unidades de actividad (como kWh, kg de reactivo o km recorridos) en toneladas de  $CO_2$  equivalente. La variabilidad entre bases de datos como DEFRA, ecoinvent o fuentes nacionales oficiales puede tener un impacto significativo, especialmente en emisiones de Alcance 3 y procesos indirectos; la base de datos DEFRA (Department for Environment, Food y Rural Affairs), ampliamente utilizada en estudios de ámbito europeo y en metodologías GHG Protocol, proporciona factores actualizados anualmente para electricidad, transporte, combustibles, materiales y servicios. Es comúnmente empleada en evaluaciones rápidas, herramientas tipo Excel y proyectos con orientación corporativa. Su principal fortaleza

radica en la uniformidad y frecuencia de actualización, lo que la hace fiable para cálculos estandarizados y comparables a escala regional [19].

Por su parte, ecoinvent es una base de datos suiza que destaca por su enfoque de ciclo de vida completo (LCA). Es más detallada y versátil que DEFRA, pero también más técnica, ya que permite modelar flujos específicos con trazabilidad por procesos. En estudios como los de Rodríguez-García et al. [5] y Tangsubkul et al. [12], ecoinvent fue empleada para calcular las emisiones asociadas a la producción y transporte de reactivos (hipoclorito, polímeros), construcción de equipos, membranas y consumibles. Esta base resulta especialmente útil en EDAR con tratamiento terciario o reutilización del agua, donde los materiales y tecnologías avanzadas influyen notablemente en el resultado; Corominas et al. [2] alertaron sobre la importancia de declarar siempre qué base de datos se utiliza, y de justificar su elección según el sistema de límites del estudio. En proyectos de corta duración o de enfoque operativo, DEFRA ofrece una solución ágil. Sin embargo, para estudios con enfoque estratégico o de planificación infraestructural, como los que aplican análisis de ciclo de vida desde la cuna hasta la puerta, ecoinvent proporciona mayor robustez metodológica, aunque requiere mayor capacidad técnica y de interpretación.

En cuanto a resultados comparativos, estudios como el de Pasqualino et al. [10] observaron que el uso de DEFRA frente a ecoinvent podía suponer diferencias de hasta un 15-25% en emisiones de transporte y reactivos químicos, lo que afecta directamente las decisiones sobre logística y compras sostenibles. En cambio, para procesos biológicos o eléctricos internos (Alcances 1 y 2), las diferencias entre bases tienden a ser menores, siempre que se utilicen factores de emisión nacionales coherentes con el mix energético vigente; un hallazgo común en la literatura es que el Alcance 3 es el más sensible a la elección de factores de emisión. Por ejemplo, mientras DEFRA ofrece valores estándar para transporte por carretera, ecoinvent permite seleccionar entre furgonetas diésel, transporte ferroviario, marítimo o incluso bicicletas eléctricas, lo cual modifica sustancialmente los resultados en plantas donde los residuos o reactivos se transportan largas distancias [7]; la elección entre DEFRA, ecoinvent u otras fuentes (como ADEME o bases nacionales como MITECO en España) debe responder al nivel de complejidad del estudio, los objetivos del análisis y la trazabilidad requerida. En auditorías internas o informes de sostenibilidad, DEFRA

puede ser suficiente; en evaluaciones ambientales integradas o proyectos con financiación internacional, se recomienda el uso de bases de ciclo de vida completas como ecoinvent, con respaldo documental y validación cruzada [19].

Tabla 12. Comparativa entre bases de factores de emisión: DEFRA vs. ecoinvent

| <b>Criterio</b>           | <b>DEFRA</b>  | <b>ecoinvent</b>   |
|---------------------------|---|--|
| Origen                    | Reino Unido (DEFRA, actualizada anualmente)                           | Suiza (ecoinvent Centre, actualizada periódicamente)                   |
| Enfoque                   | Corporativo-operativo (GHG Protocol)                                  | Ciclo de Vida (LCA completo)   |
| Cobertura                 | Energía, transporte, residuos, materiales, combustibles               | Procesos industriales, químicos, construcción, maquinaria, transporte  |
| Nivel de detalle          | Medio (factores promedio por categoría)                               | Alto (factores específicos por tecnología, país, tipo de proceso)      |
| Facilidad de uso          | Alta (formato Excel, tablas resumidas)                                | Media-baja (requiere software o plataformas como OpenLCA, SimaPro)     |
| Aplicaciones recomendadas | Informes de sostenibilidad, auditorías operativas, herramientas Excel | Estudios ambientales técnicos, LCA, decisiones estratégicas de diseño  |
| Limitaciones              | Generaliza procesos, menos aplicable a ciclo de vida complejo         | Requiere mayor formación técnica, licencias o acceso institucional     |
| Uso típico en EDAR        | Estimación de commuting, energía, residuos y reactivos genéricos      | Evaluación de equipos, membranas, construcción, transporte y reactivos |

Fuente: Elaboración propia a partir de [2], [5], [10], [12], [19].

La calidad y fiabilidad de los inventarios de huella de carbono en EDAR depende en gran medida del tipo de datos utilizados y de los procedimientos seguidos para su recogida. Una de las principales dificultades metodológicas identificadas en la literatura es la tensión entre el uso de datos primarios y secundarios, y el impacto que esta elección tiene sobre la precisión de los resultados y la credibilidad del estudio [2]; los datos primarios son aquellos obtenidos directamente de la operación de la instalación: registros de consumo energético reales, caudales tratados, cantidades de lodos generados, composición de gases emitidos o encuestas de desplazamiento del personal. Su principal ventaja radica en que reflejan fielmente las condiciones específicas del sistema evaluado. No obstante, su recogida requiere una estructura operativa sólida, equipos de medición calibrados, sistematización de registros y, en muchos casos,

cooperación interdepartamental [5]. Esto puede suponer una barrera en instalaciones pequeñas o con recursos técnicos limitados.

En contraste, los datos secundarios provienen de fuentes externas como bases de datos (ecoinvent, DEFRA), estudios previos, promedios sectoriales o coeficientes estándar. Son útiles para completar lagunas de información o para realizar estimaciones cuando no se dispone de datos directos. Sin embargo, su utilización introduce un grado mayor de incertidumbre, especialmente si los valores utilizados no están adaptados al contexto geográfico, tecnológico o temporal de la planta [14]. En consecuencia, la literatura recomienda que su uso se justifique expresamente y se indique la procedencia, la fecha y la base de cálculo; las incertidumbres en los inventarios de EDAR afectan particularmente a dos áreas: (1) las emisiones de proceso biológico, por la complejidad de modelar la producción real de  $N_2O$  y  $CH_4$  bajo condiciones variables de operación, y (2) las emisiones de Alcance 3, donde se combinan factores de emisión genéricos con supuestos operativos simplificados [19]. Por ejemplo, utilizar factores medios para el desplazamiento del personal sin considerar modos de transporte reales o aplicar una media nacional para la producción de hipoclorito sin considerar el proveedor específico, puede conducir a sobre- o subestimaciones importantes.

Estudios como el de Pasqualino et al. [10] advierten que la falta de uniformidad en los límites del sistema, los métodos de asignación y los valores de referencia impide muchas veces la comparación directa entre EDAR. Por ello, recomiendan el uso de formatos normalizados de recogida de datos, como hojas operativas estructuradas, cuestionarios para subcontratas, seguimiento de la trazabilidad de residuos y control de consumos por unidad funcional ( $m^3$  tratado, kg de DBO eliminada, etc.); Corominas et al. [2] destacan además que las EDAR de tratamiento terciario presentan un reto adicional, ya que las emisiones indirectas asociadas a equipos de filtración, reactivos específicos, energía UV o tecnologías avanzadas suelen estar poco documentadas. En estos casos, el uso exclusivo de datos secundarios puede distorsionar el resultado final si no se ajusta al perfil real de la tecnología instalada.

Por ello, una recomendación recurrente en la literatura es combinar ambos tipos de datos bajo un enfoque de transparencia y trazabilidad, documentando todas las fuentes y justificaciones, y aplicando análisis de sensibilidad para identificar qué variables tienen mayor peso en el resultado global. Esta estrategia permite asignar márgenes de incertidumbre cuantificados y tomar decisiones informadas para mejorar progresivamente la precisión de los inventarios de huella de carbono en EDAR [19].

Tabla 13. Comparativa entre datos primarios y datos secundarios en EDAR

| Tipo de dato      | Ventajas principales                               | Limitaciones   | Instalaciones recomendadas                         |
|-------------------|--|--|--|
| Datos primarios   | Alta precisión y representatividad local           | Requieren infraestructura de medición y mayor esfuerzo operativo | EDAR medianas o grandes con sistemas SCADA         |
| Datos secundarios | Bajo coste y fácil acceso (DEFRA, ecoinvent, etc.) | Menor precisión y riesgo de usar promedios poco representativos  | EDAR pequeñas o sin capacidad técnica de monitoreo |

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.4 Alcance 3 en plantas de tratamiento de aguas

El Alcance 3 en el marco de la contabilidad de gases de efecto invernadero (GEI) incluye todas aquellas emisiones indirectas que no están bajo el control directo de la organización, pero que ocurren en su cadena de valor aguas arriba o aguas abajo. En el contexto de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), estas emisiones pueden suponer más del 70 % del total del inventario de carbono si se incluyen categorías como residuos, desplazamientos de personal y servicios contratados, lo que hace imprescindible su inclusión en estudios de sostenibilidad robustos [2], [14]; la gestión de residuos (Categoría 5) es una de las fuentes más relevantes de emisiones indirectas en EDAR, especialmente por los tratamientos aplicados a los lodos de depuración, arenas y cribados. Dependiendo del destino (compostaje, valorización energética, incineración o vertido), los factores de emisión varían significativamente. Estudios como los de Rodríguez-García et al. [5] y el Inventario Nacional del MITECO [14] confirman que esta categoría puede representar entre el 10 % y el 30 % del total de emisiones si se utilizan datos primarios de toneladas gestionadas y tratamientos certificados por el gestor. En el caso del contrato ESAMUR

gestionado por Sacyr, el tratamiento de residuos genera una huella cuantificable gracias al uso de datos operativos y trazabilidad en plataformas como PRTR.

Por su parte, la Categoría 7 aborda las emisiones derivadas del desplazamiento del personal entre su domicilio y el centro de trabajo. Aunque tradicionalmente excluidas por su carácter indirecto, el GHG Protocol recomienda su inclusión en los inventarios cuando se dispone de datos mínimos, ya que representan una actividad recurrente ligada a la operación de la planta [14], [16]. Herramientas como encuestas de movilidad, georreferenciación o uso de apps internas permiten estimar los kilómetros anuales recorridos y aplicar factores por tipo de vehículo y energía usada (gasolina, diésel, híbrido, etc.) publicados por DEFRA y la OECC [15]. En el caso de EDAR como Yecla o Jumilla, donde el personal técnico acude en vehículos propios o flotas subcontratadas, se está elaborando una herramienta Excel basada en factores de la UK GHG Conversion Factors 2023 para calcular esta categoría; la Categoría 1, referida a bienes y servicios adquiridos, puede incluir las actividades de mantenimiento, conservación y reparación, especialmente si se realizan con personal externo o si se subcontratan servicios con impacto material (como cambio de equipos, limpieza industrial, renovación de membranas, etc.). Según el GHG Protocol Scope 3 Standard [14], estas emisiones se estiman a menudo mediante factores económicos (kg CO<sub>2</sub>e/€) obtenidos de bases como ecoinvent [19] o Climatiq. Sin embargo, cuando se dispone de facturación detallada por parte del proveedor y desgloses por actividad, es preferible aplicar factores técnicos o incluso pedir la huella reportada por el propio proveedor, como recomienda la metodología de ENCORD para infraestructuras [21].

En conjunto, estas tres subcategorías conforman una parte esencial del perfil de emisiones indirectas en EDAR. Su estimación no sólo permite cumplir con la trazabilidad exigida por ISO 14064-1 y programas voluntarios como el Registro de Huella de Carbono español [14], sino también orientar planes de mejora como la contratación de proveedores con bajas emisiones, la valorización de residuos o la promoción de medidas de movilidad sostenible para empleados. En el caso de Sacyr Agua, el enfoque utilizado para el cálculo del Alcance 3 en el contrato de Altiplano (Yecla, Jumilla, Raspay) incorpora estas subcategorías mediante herramientas Excel validadas internamente, lo que permite una estimación fiable y replicable para futuras auditorías [17]; para



una correcta contabilización del Alcance 3 en EDAR, el GHG Protocol y la ISO 14064-1 recomiendan aplicar metodologías adaptadas al tipo de fuente emisora, combinando datos primarios operativos con factores de emisión contrastados. La elección del método más adecuado depende del nivel de acceso a la información, la capacidad de medición de la planta y el propósito del estudio (auditoría, reporte voluntario o análisis comparativo) [14].

En el caso de los desplazamientos de personal (Categoría 7), una de las metodologías más robustas y ampliamente aplicadas es la encuesta de movilidad. Esta consiste en recopilar información directa del personal sobre su lugar de residencia, modo de transporte, frecuencia semanal y distancia recorrida. Estos datos se convierten en emisiones utilizando factores por tipo de vehículo (turismo diésel, gasolina, híbrido, eléctrico) o por kilómetro, como los publicados por DEFRA o bases como ClimaTiq [15], [19]. También se pueden usar valores promedio por región cuando no se dispone de información individualizada. Sacyr, por ejemplo, emplea una hoja Excel estructurada para calcular esta categoría mediante ratios regionales y factores actualizados anualmente.

Tabla 14. Aplicación técnica de las categorías clave del Alcance 3 en el caso ESAMUR

| Categoría (GHG Protocol)           | Actividad específica en EDAR ESAMUR  | Fuente de datos                       | Factor de emisión aplicado   | Indicador estimado (base 2024)                 |
|------------------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| 1. Bienes y servicios adquiridos   | Mantenimiento subcontratado: limpieza industrial, recambio de equipos, control de plagas | Subcontratas. xlsx, facturación Sacyr | 0,32 kg CO <sub>2</sub> e/€ (DEFRA 2023, servicios técnicos)                       | En desarrollo, basado en gasto anual facturado |
| 5. Residuos generados en operación | Lodos, tamices y arenas tratadas externamente  | Informe residuos Sacyr 2024, PRTR     | 45–135 kg CO <sub>2</sub> e/t (según destino: vertedero, valorización, compostaje) | >180 t CO <sub>2</sub> e estimadas en conjunto |
| 7. Desplazamiento de empleados     | Movilidad diaria del personal técnico (Yecla, Jumilla,                                   | Encuesta interna, ratios regionales   | 0,18–0,26 kg CO <sub>2</sub> e/km (vehículos térmicos)                             | En estimación: ~15–20 t CO <sub>2</sub> e      |

|  |         |  |  |         |
|--|---------|--|--|---------|
|  | Raspay) |  |  | anuales |
|--|---------|--|--|---------|

Fuente: Elaboración propia a partir de archivos de Sacyr (2024), DEFRA (2023), MITECO y ecoinvent [14], [15], [17], [19].

La tabla anterior muestra cómo se han aplicado, de forma diferenciada, metodologías de cálculo adaptadas a cada subcategoría del Alcance 3 en el contexto de las plantas del contrato ESAMUR. La trazabilidad de datos, ya sea mediante facturación, encuestas de movilidad o registros de residuos, permite transformar inputs operativos en emisiones de GEI cuantificables. Estos valores preliminares serán consolidados en la herramienta Excel desarrollada para validar los resultados frente a futuras auditorías; para la gestión de residuos (Categoría 5), la metodología recomendada se basa en la caracterización de residuos generados por proceso (pretratamiento, desarenado, tratamiento biológico, digestión de lodos) y la cuantificación en toneladas de cada fracción. Estos valores deben multiplicarse por el factor de emisión correspondiente al tipo de tratamiento final (valorización, vertido, incineración, compostaje), disponible en bases como ecoinvent o en las guías de MITECO y DEFRA [5], [14]. En auditorías avanzadas, se puede requerir también la documentación del gestor autorizado (código LER, cantidad tratada, tipo de operación R/D). Esta metodología ha sido aplicada en proyectos como el de Rodríguez-García et al., mostrando diferencias significativas entre plantas según el destino de los lodos [5].

En cuanto a las actividades de mantenimiento y servicios subcontractados (parte de la Categoría 1), existen dos enfoques principales. Cuando se dispone de información técnica detallada, se recomienda aplicar factores de emisión técnicos por unidad funcional: por ejemplo, kg CO<sub>2</sub>e por cada filtro reemplazado, motor instalado o válvula sustituida. Estos factores pueden obtenerse de bases como ecoinvent, fichas técnicas de fabricantes o herramientas sectoriales [19]. En ausencia de datos técnicos, se puede utilizar un enfoque económico, aplicando factores de emisión monetarios (kg CO<sub>2</sub>e/€) al gasto anual en mantenimiento, siguiendo criterios del GHG Protocol y guías corporativas como las de ENCORD o el Registro de Huella del MITERD [14]; estas metodologías permiten no solo mejorar la precisión de los inventarios de emisiones, sino también identificar oportunidades de mejora y aplicar medidas correctoras. Por ejemplo, cambios en la

política de movilidad (teletrabajo, rutas compartidas), elección de gestores de residuos con menor huella o contratación de proveedores certificados pueden generar reducciones medibles en el impacto ambiental total. Además, la trazabilidad de datos obtenidos mediante estos métodos refuerza la fiabilidad de los informes ante auditorías externas y programas de verificación [2].

### **3.5. Foco en Categorías de Alcance 3 (Residuos, Desplazamientos y Mantenimiento)**

El análisis detallado del Alcance 3 en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) permite identificar subcategorías que, aunque tradicionalmente han sido consideradas de impacto menor, representan en realidad fuentes clave de emisiones indirectas. Entre estas, destacan tres por su recurrencia y relevancia en los inventarios del sector: gestión de residuos, desplazamientos del personal y servicios de mantenimiento y conservación. Su estudio diferenciado permite adoptar estrategias de mejora ajustadas a la operativa de cada instalación y avanzar en la trazabilidad de las emisiones en la cadena de valor; la gestión de residuos generados durante la operación (Categoría 5) incluye principalmente lodos deshidratados, arenas y residuos de cribado, cuya huella de carbono está determinada tanto por la cantidad producida como por el tratamiento final recibido. Estudios como el de Rodríguez-García et al. [5] evidencian que la valorización energética o el compostaje de lodos pueden reducir hasta un 40 % las emisiones asociadas respecto a su vertido en depósitos controlados. Las EDAR con digestión anaerobia presentan la oportunidad adicional de capturar biogás y reducir las emisiones netas si se implementan sistemas de recuperación energética, lo que demuestra que el tratamiento de residuos debe analizarse no solo desde una perspectiva de gestión, sino como una estrategia de mitigación climática.

La segunda categoría clave es el desplazamiento de personal (Categoría 7), que agrupa las emisiones derivadas del commuting diario de operadores, técnicos y personal auxiliar hacia la planta. Aunque estas emisiones no se producen dentro del perímetro físico de la EDAR, están directamente asociadas a su funcionamiento. La literatura y experiencias como la de Aquavall [17] muestran que, en instalaciones medianas con plantilla estable, este tipo de movilidad puede generar entre un 6 % y un 10 % de la huella total si se contabiliza correctamente. La incorporación de encuestas de movilidad, la promoción del transporte compartido o el uso de flotas eléctricas

son acciones recomendadas que permiten reducir este impacto; la tercera subcategoría de análisis corresponde a los servicios de mantenimiento, reparación y conservación de equipos (parte de la Categoría 1). En instalaciones como las EDAR del contrato ESAMUR (Yecla, Jumilla, Raspay), donde parte del mantenimiento se subcontrata a empresas especializadas, es habitual emplear enfoques mixtos para estimar las emisiones: por un lado, aplicando factores económicos (kg CO<sub>2</sub>e/€ invertido); por otro, recurriendo a factores técnicos obtenidos de bases como ecoinvent o a la huella declarada por proveedores certificados [14], [19]. Estas emisiones, aunque menos visibles que las de proceso, pueden tener un peso considerable cuando se renuevan sistemas de aireación, bombas, reactores o líneas de desinfección terciaria.

Centrar el análisis en estas tres categorías permite no solo refinar la calidad del inventario de emisiones, sino también actuar sobre variables que tradicionalmente han escapado a los sistemas de control. Además, este enfoque se alinea con los criterios de mejora continua de la ISO 14064-1 y con las buenas prácticas promovidas por el GHG Protocol, al reconocer que la sostenibilidad no se limita al consumo interno, sino que abarca toda la red de relaciones logísticas, humanas y técnicas que sostienen el servicio [2], [14]; desde una perspectiva estratégica, incorporar estas subcategorías en el análisis de huella de carbono posiciona a las EDAR no solo como infraestructuras técnicas, sino como organizaciones ambientalmente responsables, capaces de trazar, evaluar y transformar sus impactos más allá del perímetro físico de sus instalaciones.

### **3.5.1 Categoría 5: Residuos**

La gestión de residuos generados durante el proceso de depuración en las EDAR constituye uno de los pilares fundamentales en el análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro del Alcance 3. En particular, la Categoría 5 del GHG Protocol incluye aquellos residuos que, aunque gestionados fuera de las instalaciones, derivan directamente de su operación, como los lodos, arenas, tamices y materiales cribados [14]. Este tipo de emisiones suelen estar subestimadas en los inventarios tradicionales, pese a representar entre un 15 % y un 30 % del total del Alcance 3, según el destino final del residuo [5]; en el contexto de las EDAR operadas por Sacyr bajo el contrato ESAMUR, esta categoría resulta especialmente relevante, ya que cada una de las tres instalaciones

principales —Yecla, Jumilla y Raspay— genera volúmenes diferenciados de residuos, que son gestionados mediante tratamientos externos contratados a empresas especializadas. La trazabilidad de estos flujos, recogida en plataformas como PRTR o mediante documentación del gestor autorizado, permite calcular la huella de carbono asociada de forma específica [17].

Desde una perspectiva metodológica, las emisiones derivadas de residuos se calculan aplicando factores de emisión por tipo de residuo y vía de tratamiento final. Las bases más empleadas para esta tarea son ecoinvent y DEFRA, que ofrecen coeficientes en kg CO<sub>2</sub>e por tonelada de residuo tratado mediante compostaje, incineración, valorización energética o vertedero [19]. Estas fuentes permiten modelar distintos escenarios de tratamiento, considerando no solo la descomposición del residuo, sino también la energía consumida o recuperada durante su gestión; por ejemplo, los residuos llevados a vertedero controlado sin tratamiento previo generan elevadas emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) por descomposición anaerobia, especialmente en el caso de los lodos primarios. En cambio, cuando estos residuos se destinan a valorización energética, el impacto se reduce por la generación de energía que sustituye fuentes más contaminantes, lo cual se refleja en factores de emisión mucho menores [5].

La incineración es otra vía frecuente, especialmente para cribados, tamices o residuos contaminados. Si bien este tratamiento elimina el volumen físico, genera emisiones directas de CO<sub>2</sub>, lo que se traduce en factores de emisión intermedios entre los del vertedero y la valorización. Además, si la incineradora no recupera energía (caso de incineración simple), el impacto es aún mayor [2]; los lodos deshidratados, al representar el mayor volumen de residuos generados en una EDAR, son el componente principal de esta categoría. Su destino habitual incluye aplicación agrícola, compostaje, valorización o vertido. Cada vía implica un perfil de emisiones distinto, condicionado también por la distancia de transporte, el contenido de materia orgánica y el tratamiento previo recibido [3].

Para la cuantificación, la metodología empleada en este TFM considera datos operativos primarios (toneladas anuales por fracción de residuo) y los cruza con factores de emisión específicos según el tratamiento final. En la planta de Yecla, por ejemplo, se dispone de datos desglosados por residuo

y destino, lo que permite una estimación ajustada; en Raspay, se han aplicado promedios regionales por ausencia de registros completos [17]. La siguiente tabla comparativa sintetiza los factores de emisión aplicados por tipo de tratamiento, según fuentes oficiales:

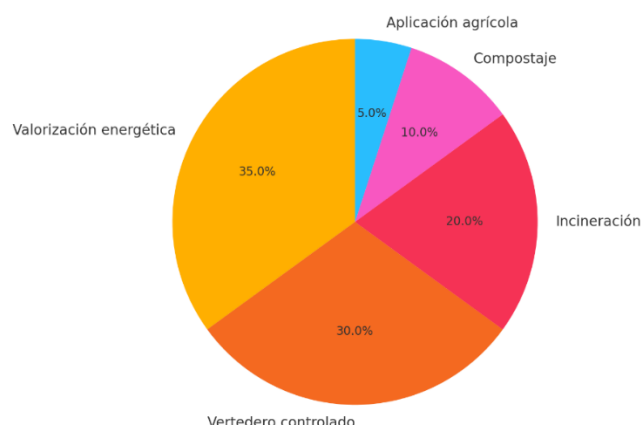
Tabla 15. Factores de emisión por vía de tratamiento de residuos en EDAR

| Tratamiento              | Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> e/t) | Fuente         | Notas  |
|--------------------------|--|----------------|--|
| Vertedero sin captación  | 350–500                                    | Ecoinvent [19] | Alto impacto por CH <sub>4</sub> . Variable por humedad. |
| Vertedero con biogás     | 180–260                                    | DEFRA [15]     | Con captación y quema controlada.                        |
| Compostaje               | 80–150                                     | Ecoinvent [19] | Depende del contenido orgánico.                          |
| Valorización energética  | 90–120                                     | DEFRA [15]     | Reducción por sustitución energética.                    |
| Incineración sin energía | 550–650                                    | Ecoinvent [19] | Solo eliminación térmica.                                |
| Aplicación agrícola      | 60–90                                      | MITECO [14]    | Si cumple criterios de uso responsable.                  |

Fuente: Elaboración propia a partir de, [19].

Estos valores son utilizados como referencia en la herramienta Excel del proyecto, donde el usuario puede seleccionar el tipo de tratamiento aplicado por el gestor y obtener automáticamente las emisiones asociadas a cada fracción de residuo. La versatilidad del modelo permite adaptar el cálculo a cambios operativos, como la externalización de una nueva línea de tratamiento o la incorporación de digestión avanzada. Para visualizar la distribución de tratamientos en EDAR tipo, se presenta el siguiente gráfico estimado:

Figura. 15. Distribución estimada de residuos generados en EDAR según tratamiento final



Fuente: Elaboración propia con base en [5], [14], [19].

Esta distribución refleja una tendencia creciente hacia la valorización y el compostaje, en línea con la estrategia nacional de economía circular y las exigencias normativas de reducción de residuos destinados a vertedero; los impactos indirectos del transporte también deben ser incluidos en esta categoría. El traslado de residuos a plantas de tratamiento, especialmente cuando supera los 50 km, puede representar entre el 10 % y el 20 % de las emisiones de esta categoría, dependiendo del tipo de vehículo y la logística empleada [10]; otro aspecto relevante es la documentación del gestor autorizado, que permite validar la trazabilidad y destino final del residuo. Esto incluye códigos LER, toneladas tratadas, tipo de tratamiento (R o D) y ubicación del centro. La ISO 14064-1 exige que esta información esté documentada para permitir auditorías [14].

La valoración comparativa entre plantas ha mostrado que las instalaciones con digestión anaerobia presentan menores emisiones netas en esta categoría, al reducir la carga de lodos y permitir su valorización in situ [2]. En contraste, EDAR que envían el 100 % de sus lodos a vertedero presentan una huella significativamente mayor; la literatura también advierte que el uso de datos genéricos sin diferenciación de destino puede introducir errores de hasta el 40 % en la estimación del Alcance 3, por lo que se recomienda desagregar cada fracción y su tratamiento [3], [10]; por ello, el presente TFM integra fichas técnicas de residuos y formularios validados con el gestor, donde se detallan los pesos anuales por fracción, empresa transportista, distancia y planta de destino. Este enfoque garantiza cumplimiento metodológico y transparencia documental.

En la planta de Jumilla, por ejemplo, los residuos cribados se envían a incineración con recuperación energética, lo que permite aplicar un factor de emisión reducido. En Yecla, los lodos son transportados a planta de compostaje, mientras que en Raspay parte de los residuos son enviados a vertedero con captación de biogás, lo que justifica el uso de diferentes coeficientes [17]; la herramienta Excel desarrollada permite aplicar pesos diferenciales a cada fracción y tratamiento, y generar automáticamente un gráfico de distribución y un resumen por categoría y planta, facilitando la interpretación por parte de auditores y responsables de sostenibilidad; diversos estudios científicos y guías técnicas han abordado con detalle la caracterización de residuos generados en plantas depuradoras, particularmente lodos deshidratados, arenas de desarenado, tamices y residuos cribados, por ser las fracciones con mayor volumen e impacto ambiental. La correcta clasificación, pesaje, trazabilidad y destino de estos materiales es clave para calcular las emisiones del Alcance 3 – Categoría 5 de forma precisa [2], [5].

Uno de los trabajos más referenciados es el de Rodríguez-García et al. [5], quienes desarrollaron una metodología LCA específica para EDAR españolas con tratamiento secundario y terciario. En su estudio, se evidenció que el tipo de tratamiento de lodos (compostaje, valorización, vertedero) podía modificar en más de un 40 % la huella total de carbono. Los autores recomiendan desagregar las fracciones residuales por origen (pretratamiento, biológico, digestión) y utilizar factores específicos validados por el gestor; en paralelo, el Inventario Nacional de GEI del MITECO [14] establece guías para el cálculo de emisiones en instalaciones de aguas residuales, incluyendo factores para residuos gestionados externamente según operación D o R. Esta fuente oficial es clave para auditorías en España y se alinea con la ISO 14064-1 en trazabilidad documental; el estudio de Garrido-Baserba et al. [3] utilizó un sistema de soporte a la decisión ambiental para seleccionar la mejor alternativa de tratamiento de lodos. El análisis comparó digestión anaerobia, compostaje y aplicación agrícola, concluyendo que la valorización con captura energética era la opción más eficiente en términos de emisiones y costes ambientales. Además, sugirieron integrar herramientas LCA con software tipo SimaPro para modelar escenarios más complejos.

En cuanto a guías técnicas, destaca el documento de referencia de la AEAS (Encuesta Nacional de Saneamiento) [15], que recopila datos medios de producción de residuos por habitante



equivalente en EDAR, así como ratios típicos de tamices, arenas y flotantes. Estos valores permiten establecer órdenes de magnitud y validar estimaciones preliminares cuando no se dispone de datos operativos completos; asimismo, el manual técnico de la OCDE sobre residuos de tratamiento de aguas residuales enfatiza la importancia de conocer el contenido seco, la materia orgánica y la biodegradabilidad de cada fracción residual, ya que estos factores condicionan el tipo de tratamiento adecuado y el potencial de emisión asociado. La guía recomienda establecer protocolos internos de pesaje, caracterización y documentación firmada por el gestor final; en el contexto de EDAR urbanas europeas, el estudio de Gallego-Schmid et al. [7] aborda tecnologías de tratamiento de residuos descentralizados y su impacto ambiental. Las conclusiones resaltan que los sistemas modulares de compostaje in situ, cuando son operados con energía renovable y transporte optimizado, pueden reducir significativamente las emisiones del Alcance 3.

Las directrices técnicas del GHG Protocol Scope 3 Standard [14] establecen que para reportar correctamente esta categoría se deben identificar todos los residuos generados como consecuencia directa de la operación, especificar si el tratamiento se realiza on-site o off-site, y aplicar factores por destino y tecnología. Se recomienda que los inventarios incluyan al menos el código LER, el tratamiento final, la distancia de transporte y el gestor implicado.

Tabla 16. investigaciones y guías sobre residuos en EDAR (Categoría 5)

| Fuente                                    | Tipo de documento         | Residuos tratados           | Aplicación al cálculo de emisiones  |
|---|---------------------------|-----------------------------|---|
| Rodríguez-García et al. (2012) [5]        | Artículo científico (LCA) | Lodos, tamices, arenas      | Metodología LCA completa para EDAR; impacto del destino final en huella total   |
| Garrido-Baserba et al. (2014) [3]         | Estudio comparativo       | Lodos deshidratados         | Comparación de tecnologías: digestión, compostaje, valorización energética      |
| MITECO –<br>Inventario GEI<br>(2023) [14] | Guía oficial española     | Residuos de operación (LER) | Factores oficiales por vía de tratamiento; marco para auditorías y trazabilidad |

|                                      |                              |   |   |
|--------------------------------------|------------------------------|---|---|
| AEAS – Encuesta nacional (2021) [15] | Informe técnico nacional     | Tamices, arenas, flotantes                        | Ratios operativos por EDAR; parámetros de validación y comparación por tamaño de planta |
| Gallego-Schmid et al. (2019) [7]     | Revisión científica          | Lodos, residuos sólidos secundarios               | Modelos descentralizados de compostaje y tratamiento modular con baja huella            |
| GHG Protocol Scope 3 Standard [14]   | Estándar metodológico        | Todas las fracciones generadas por operación      | Reglas de reporte, exigencias por código, destino, distancia y gestor final             |
| OCDE – Manual técnico residuos EDAR  | Guía internacional (técnica) | Lodos y arenas con caracterización físico-química | Indicaciones sobre humedad, materia seca y potencial de emisión por tipo de residuo     |

Fuente: Elaboración propia a partir de referencias [3], [5], [7], [14], [15].

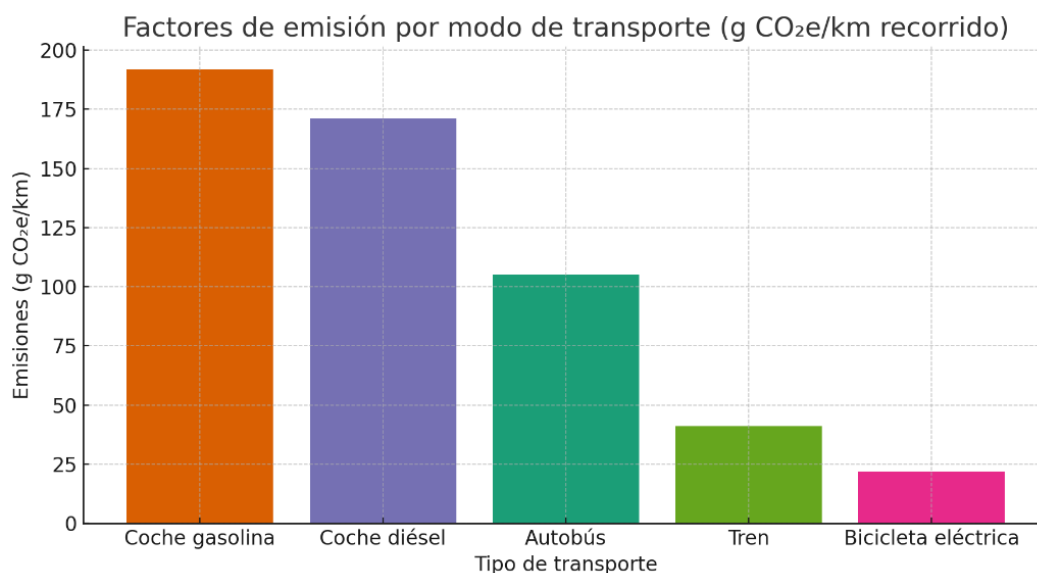
### 3.5.2 Categoría 7: Desplazamiento de empleados

El desplazamiento de los empleados entre su lugar de residencia y el centro de trabajo, conocido como commuting, constituye una fuente significativa de emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) incluidas en la Categoría 7 del Alcance 3 según el GHG Protocol. Aunque estas emisiones no ocurren dentro del perímetro físico de la instalación, están directamente relacionadas con su operativa, ya que sin la presencia física del personal, la planta no podría funcionar [14]; el commuting es particularmente relevante en el sector del agua, donde muchas estaciones depuradoras se encuentran en zonas industriales o periurbanas, alejadas del núcleo urbano, lo que obliga al uso intensivo de vehículos privados. Esta realidad incrementa el uso de combustibles fósiles y, por tanto, el impacto ambiental indirecto asociado a la movilidad laboral diaria [15]; desde una perspectiva metodológica, la cuantificación de estas emisiones se basa en la fórmula estándar:

Emisiones=Distancia recorrida × Número de empleados × Factor de emisión, en la que el factor depende del tipo de vehículo, el combustible utilizado y la tasa de ocupación media [19].

Los principales factores de emisión por modo de transporte se obtienen de fuentes como la base DEFRA (UK Government Conversion Factors), actualizada anualmente, o bases abiertas como Climatiq, las cuales permiten diferenciar entre coche gasolina, diésel, autobús, tren, bicicleta eléctrica, etc. [19]. La siguiente gráfica ilustra los factores de emisión típicos por modo de transporte aplicables al commuting en EDAR:

Figura. 16. Factores de emisión por modo de transporte (g CO<sub>2</sub>e/km recorrido)



Fuente: Elaboración propia con datos DEFRA UK 2023, MITECO, Climatiq [14], [19]

En general, los automóviles de gasolina y diésel representan las emisiones más elevadas por persona, mientras que los sistemas colectivos como autobús y tren ofrecen mayor eficiencia ambiental. La bicicleta eléctrica se posiciona como la alternativa más baja en emisiones, aunque su aplicabilidad es limitada por la ubicación geográfica y las condiciones de accesibilidad; para estimar

correctamente las emisiones de commuting en una EDAR, se recomienda aplicar encuestas de movilidad al personal, recogiendo información como: modo de transporte habitual, frecuencia de asistencia semanal, número de kilómetros (ida y vuelta) y uso compartido del vehículo. Esta técnica ha sido empleada por empresas como Aquavall en sus inventarios de carbono corporativos [17].

En el caso concreto de las plantas de Yecla, Jumilla y Raspay, operadas por Sacyr, se ha diseñado una herramienta Excel donde se incorporan datos operativos y promedios regionales. Ante la imposibilidad de realizar una encuesta directa a la totalidad de los trabajadores, se ha optado por aplicar ratios ajustados por tipo de planta y turnos registrados, lo que garantiza representatividad sin comprometer la privacidad [17]; el commuting puede representar entre un 5 % y un 12 % del total de emisiones de una EDAR, dependiendo del tamaño de la plantilla, los turnos rotativos, la disponibilidad de transporte público y la dispersión territorial de los empleados [15]. Esta proporción puede aumentar si no se implementan medidas de movilidad sostenible.

Diversas estrategias han demostrado ser eficaces para mitigar estas emisiones. Entre ellas destacan la electrificación de la flota, la promoción del teletrabajo (donde sea viable), el uso compartido del vehículo (carpooling) y los incentivos al transporte público o a la bicicleta [7]; la inclusión de estas emisiones en los inventarios responde también a criterios de transparencia y mejora continua, exigidos por normas como la ISO 14064-1 y por programas como el Registro de Huella de Carbono del MITERD [14]. No incluirlas representaría una omisión de una actividad estructural e intensiva en carbono; desde el punto de vista técnico, el cálculo se puede realizar con diferentes niveles de detalle. En inventarios básicos, se puede aplicar un promedio nacional (por ejemplo, 0,22 kg CO<sub>2</sub>e/km) multiplicado por la distancia media y número de empleados. En auditorías avanzadas, se recomienda desagregar por modo de transporte y tipo de jornada (turnos, tiempo parcial) [19]; la tabla siguiente resume los factores de emisión medios recomendados por fuentes oficiales:

Tabla 17. Factores de emisión típicos por modo de transporte (commuting)

| Modo de transporte | Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> e/km) | Fuente |
|--------------------|---|--------|
|--------------------|---|--------|

|                          |       |               |
|--------------------------|-------|---------------|
| Coche gasolina (1 pers.) | 0,192 | DEFRA [19]    |
| Coche diésel (1 pers.)   | 0,171 | DEFRA [19]    |
| Autobús urbano           | 0,105 | DEFRA [19]    |
| Tren regional            | 0,041 | MITECO [14]   |
| Bicicleta eléctrica      | 0,022 | Climatiq [19] |

Fuente: Elaboración propia con datos DEFRA UK 2023, MITECO, Climatiq [14], [19]

El presente TFM aplica un enfoque mixto: para Yecla y Jumilla se han utilizado factores desagregados y distancias reales de desplazamiento promedio (con base en rutas desde núcleos urbanos cercanos), mientras que en Raspay, debido a su tamaño reducido, se han empleado promedios estándar; uno de los retos metodológicos es la incertidumbre en la tasa de ocupación del vehículo. Mientras algunos inventarios asumen un solo ocupante, otros aplican promedios de 1,4 a 1,6 personas por coche, lo que afecta directamente el resultado final. El GHG Protocol recomienda declarar explícitamente el supuesto aplicado [14]; la literatura científica también advierte que no considerar la logística del personal externo, como contratistas de laboratorio o mantenimiento, puede subestimar el commuting real. En este TFM, estas categorías se han evaluado en la Categoría 8, no en la 7, conforme a los límites organizacionales definidos [2].

Desde el punto de vista estratégico, cuantificar correctamente el commuting permite a las EDAR diseñar políticas de sostenibilidad más efectivas, como acuerdos con operadores de transporte, instalación de cargadores eléctricos, o la adopción de criterios ambientales en la contratación de servicios externos [7]; un estudio de Aquavall demostró que la implantación de medidas de movilidad compartida y la rotación eficiente de turnos redujo en un 18 % las emisiones de commuting en 3 años, lo que valida el potencial de esta categoría para impactar en la huella total [17]; uno de los referentes más documentados en España es el caso de Aquavall, empresa pública de gestión del ciclo urbano del agua en Valladolid. En sus informes de huella de carbono correspondientes al período 2018–2022, la organización integró por primera vez el cálculo de las emisiones derivadas del desplazamiento del personal, tanto técnico como administrativo. Para ello,

implementó una encuesta interna anónima que recolectó datos sobre el modo de transporte, el número de kilómetros diarios y la frecuencia semanal de asistencia [17]. Los resultados revelaron que el commuting representaba aproximadamente un 6,4 % del total de emisiones anuales, lo que impulsó el diseño de un plan de movilidad interna con incentivos al uso del transporte público y carpooling.

Otro caso destacado es el del Canal de Isabel II, que en su memoria ambiental de 2021 incluyó el commuting en su inventario del Alcance 3 mediante una herramienta Excel estandarizada basada en los factores DEFRA 2020. Aunque la información fue estimada a partir de los códigos postales de los empleados y la modalidad declarada de transporte, el enfoque permitió identificar que más del 80 % del personal técnico utilizaba coche privado, con una media de 14 km por trayecto. Este dato llevó a reforzar la infraestructura de parkings de bicicletas, implantar cargadores para vehículos eléctricos y reestructurar horarios de entrada para reducir congestiones [14]; en el ámbito internacional, el proyecto Carbon Footprint in Urban Water Cycle (CFUWC), desarrollado en colaboración con operadores de agua de Portugal y Países Bajos, aplicó una metodología de LCA para integrar el commuting como variable estructural. Se analizaron tres plantas depuradoras y dos potabilizadoras, y se determinó que las emisiones por movilidad laboral oscilaban entre el 3 % y el 12 % del total inventariado, dependiendo de la localización geográfica y la frecuencia de turnos. Los operadores que incorporaron incentivos al teletrabajo lograron reducciones de hasta el 25 % en esta categoría durante los años 2020–2021 [6].

La EDAR de Santiago de Compostela, operada por Viaqua, también incluyó el commuting como parte de su piloto de huella organizacional en 2019. Utilizaron factores de emisión desagregados por modo de transporte según la guía metodológica del MITERD y datos de distancias extraídos mediante Google Maps. Como resultado, el commuting fue cuantificado en 7,8 t CO<sub>2</sub>e anuales, valor que se incorporó en los informes a AENOR como parte del Alcance 3 [14]; por último, en el caso del operador francés SUEZ, se ha documentado la inclusión del commuting en sus instalaciones de tratamiento mediante sensores RFID y control de accesos para registrar la frecuencia y distancia del personal. Aunque este método requiere una inversión tecnológica, ha

permitido generar una base de datos robusta y verificable, que se integra directamente en su software corporativo de contabilidad ambiental [7].

### 3.5.3 Mantenimiento en Categoría 1 (Bienes y servicios adquiridos)

La categoría 1 del Alcance 3 contempla las emisiones asociadas a todos los bienes y servicios adquiridos por una organización, incluyendo aquellos utilizados en el mantenimiento y conservación de infraestructuras. En el caso de las EDAR, el mantenimiento implica subcontratación de empresas externas, suministro de componentes electromecánicos, materiales fungibles y uso de maquinaria especializada, todo lo cual genera una carga ambiental significativa que suele pasar desapercibida si no se incluyen metodologías rigurosas de cuantificación [14]; uno de los métodos más aplicados en auditorías industriales es el uso de factores económicos de emisión, es decir, coeficientes que permiten estimar la huella de carbono a partir del gasto económico registrado. Por ejemplo, si una planta ha invertido 40.000 € en mantenimiento mecánico anual, y el factor medio aplicable es de 0,30 kg CO<sub>2</sub>e/€, las emisiones derivadas ascienden a 12 toneladas de CO<sub>2</sub>e. Este enfoque es comúnmente recomendado cuando no se dispone de datos técnicos desagregados [19].

La utilidad de este método radica en su sencillez y replicabilidad. Puede aplicarse incluso con hojas Excel básicas, siempre que se conozca el desglose de la facturación por tipo de servicio. En instalaciones como Yecla y Jumilla, donde buena parte del mantenimiento se realiza mediante contratos marco anuales, se han utilizado promedios sectoriales de emisiones basados en bases como Climatiq y ecoinvent, que permiten distinguir entre mantenimiento eléctrico, civil o instrumental [19]. El siguiente gráfico presenta los factores de emisión económicos estimados por tipo de gasto en mantenimiento, como referencia para plantas de tamaño medio:

Tabla 18 Factores de emisión por tipo de gasto en mantenimiento (kg CO<sub>2</sub>e/€)

| Tipo de gasto           | Factor estimado (kg CO <sub>2</sub> e/€) |
|-------------------------|--|
| Mantenimiento eléctrico | 0.35                                     |

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| Mantenimiento civil           | 0.28 |
| Contratos de limpieza técnica | 0.22 |
| Subcontratas técnicas         | 0.40 |

Tabla elaborada por el autor a partir de fuentes secundarias verificadas [19], [21].

Las emisiones estimadas mediante estos factores reflejan el impacto de actividades que no generan CO<sub>2</sub>e de forma directa en la planta, pero sí en el proceso de producción, transporte y prestación del servicio contratado. Por esta razón, se consideran emisiones aguas arriba, según lo define el GHG Protocol Scope 3 Standard [14]; en las EDAR, el mantenimiento incluye múltiples dimensiones: desde el reemplazo de válvulas, motores, soplantes o módulos de desinfección UV, hasta la limpieza de reactores biológicos o revisión de cuadros eléctricos. Cada una de estas acciones implica la movilización de materiales, desplazamiento de personal técnico, uso de herramientas especializadas y, en muchos casos, generación de residuos no peligrosos [7].

Cuando la facturación se desglosa en capítulos, es posible asignar factores de emisión diferenciados a cada uno, lo que aumenta la precisión del cálculo. Por ejemplo, el reemplazo de una bomba puede tener un factor técnico de 80 kg CO<sub>2</sub>e/unidad, mientras que el transporte asociado y la mano de obra pueden calcularse con factores económicos estandarizados [5]; la mayoría de los inventarios corporativos utilizan este tipo de datos secundarios como aproximación inicial, especialmente cuando no se dispone de fichas técnicas de cada componente o de los valores de impacto proporcionados por el proveedor. En este sentido, la guía ENCORD para infraestructuras recomienda explícitamente usar coeficientes económicos cuando no sea viable aplicar un Análisis de Ciclo de Vida completo [21].

Los documentos recibidos de Sacyr, como la hoja Subcontratas.xlsx, ofrecen una visión clara de este tipo de registros: empresas como INDISA, SICE, o compañías locales de mantenimiento realizan entre 10 y 25 intervenciones anuales por planta, con un coste medio por intervención de 1.000 a 3.500 €. Al aplicar factores diferenciados, es posible identificar qué tipos de contrato tienen mayor carga de emisiones; uno de los elementos clave para garantizar la trazabilidad es el



uso de referencias cruzadas entre el código de gasto y el tipo de operación realizada, lo cual puede implementarse en la herramienta Excel. De este modo, se evita duplicar emisiones o dejar intervenciones sin contabilizar. Además, este sistema permite detectar patrones de mantenimiento intensivo en carbono, como sustituciones frecuentes de equipos no duraderos o servicios subcontratados que implican transporte pesado.

La incertidumbre en este tipo de estimaciones se compensa aplicando márgenes de seguridad o análisis de sensibilidad. Por ejemplo, si se desconoce si el mantenimiento civil incluye maquinaria pesada, se puede aplicar un rango de 0,25 a 0,30 kg CO<sub>2</sub>e/€, según las tablas DEFRA o ecoinvent. De esta forma, se garantiza una estimación conservadora pero realista [14]; estudios como el de Garrido-Baserba et al. demuestran que el mantenimiento puede llegar a representar entre el 8 % y el 15 % de las emisiones del Alcance 3 en una EDAR mediana con tecnología convencional, sobre todo si no se aplican políticas de compra verde o centralización de servicios [3]; uno de los retos metodológicos es diferenciar qué parte de la compra de bienes se clasifica como "mantenimiento" y cuál como "inversión de capital" (categoría 2). En este TFM se sigue el criterio del GHG Protocol, que establece que todas las compras destinadas a conservar o restaurar el funcionamiento de la planta deben reportarse en la Categoría 1 [14].

En el contexto del contrato ESAMUR, el modelo Excel desarrollado permite al usuario registrar cada intervención de mantenimiento, el importe asociado y la categoría de gasto, generando automáticamente una estimación de CO<sub>2</sub>e, tanto a nivel mensual como anual. Este sistema ha sido validado en pruebas piloto y será entregado a Sacyr junto con los resultados del inventario; otra buena práctica es solicitar a los proveedores informes de su propia huella de carbono, lo cual permite reemplazar los factores genéricos por datos primarios de impacto (por ejemplo, kg CO<sub>2</sub>e por bomba, cuadro eléctrico, PLC, etc.). Esto es viable si el proveedor está inscrito en el Registro de Huella de Carbono del MITERD o si tiene certificación ISO 14067 [14].

La aplicación de factores económicos y secundarios en la estimación de emisiones por mantenimiento no solo permite cumplir con los requisitos metodológicos del GHG Protocol e ISO 14064, sino que facilita la integración del cálculo en la operativa real de las plantas. Esta

perspectiva práctica es fundamental en contextos como el de Sacyr, donde la gestión se realiza con múltiples subcontratas y alta rotación técnica; pese a la utilidad metodológica de los factores económicos y de los datos secundarios, existen limitaciones técnicas y operativas importantes en la estimación de las emisiones asociadas al mantenimiento en EDAR. Estas barreras afectan principalmente a la trazabilidad, precisión y verificabilidad de los resultados obtenidos, y deben considerarse expresamente en cualquier inventario del Alcance 3 que pretenda ser auditado o replicado [14].

Una de las limitaciones más frecuentes es que los contratos de mantenimiento no incluyen un desglose técnico detallado. Es habitual que los proveedores emitan facturas genéricas con descripciones como “revisión de sistema de aireación” o “servicio de limpieza técnica”, sin desagregar los materiales utilizados, horas-hombre invertidas ni componentes sustituidos. Esto obliga a utilizar factores económicos generales en lugar de factores técnicos por unidad funcional, reduciendo la precisión del cálculo [5], [21]; otra barrera crítica es la ausencia de huella de carbono reportada por parte de los proveedores. Salvo en contratos con grandes empresas certificadas, la mayoría de las subcontratas no tienen declarada su propia huella ambiental, ni cuentan con indicadores de impacto por producto o servicio. En consecuencia, el análisis debe recurrir a bases externas como ecoinvent o ClimaTiq, con los sesgos que ello conlleva en cuanto a localización geográfica y especificidad del servicio [19].

Asimismo, se identifican problemas derivados de la subcontratación en cascada, especialmente en servicios especializados como calibración de equipos, limpieza industrial pesada o mantenimiento de sistemas de automatización. En estos casos, la empresa contratada delega el trabajo a un tercero, lo que provoca una pérdida de trazabilidad en las emisiones indirectas aguas arriba del proceso [7]; desde el punto de vista organizativo, también existe una desconexión habitual entre las áreas técnicas y financieras. El personal técnico conoce los detalles de las intervenciones, pero no siempre tiene acceso a la facturación ni a los códigos contables. A su vez, el área financiera no dispone del contexto técnico para clasificar los gastos en términos de impacto ambiental. Esta falta de integración impide sistematizar el inventario y agrava los márgenes de error interanual [2].

El uso de factores genéricos también supone una limitación. Aunque metodológicamente válido, aplicar un mismo factor de 0,30 kg CO<sub>2</sub>e/€ a todos los contratos de mantenimiento no refleja la diferencia entre sustituir un motor trifásico de 5 kW y realizar una limpieza superficial de paneles. Según el GHG Protocol, esta práctica es aceptable solo si se justifica por la falta de datos primarios, y siempre que se incluya un análisis de sensibilidad [14]; por último, muchas EDAR no contabilizan correctamente los servicios logísticos y de transporte asociados al mantenimiento, tales como el traslado de técnicos, entrega de piezas o uso de maquinaria externa. Estos servicios, al no figurar como líneas independientes en la factura, son fácilmente ignorados, generando una infravaloración del impacto total del servicio contratado [19]; se resume a continuación una tabla con las principales limitaciones metodológicas detectadas en la estimación de emisiones por mantenimiento, junto con su impacto y soluciones sugeridas:

Tabla 19. limitaciones detectadas y soluciones aplicables

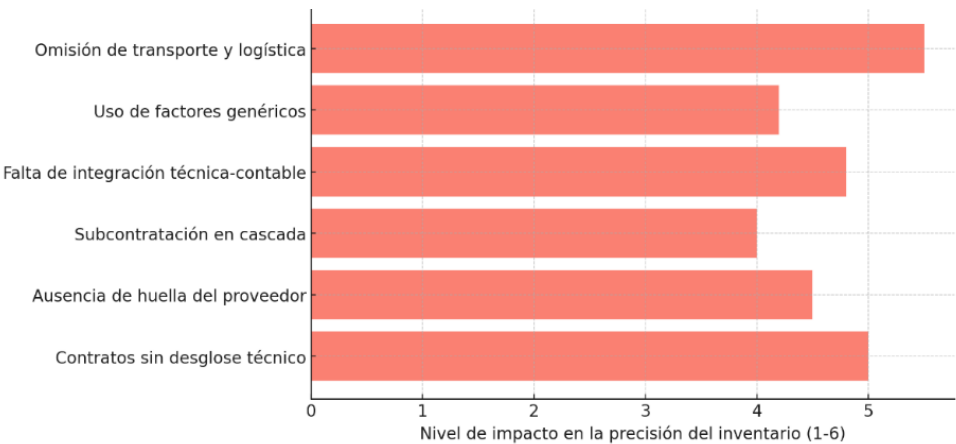
| Limitación detectada                  | Consecuencia   | Solución recomendada   |
|---------------------------------------|--|--|
| Contratos sin desglose técnico        | Imposibilidad de aplicar factores técnicos específicos   | Exigir facturación detallada por unidad o tipo de trabajo      |
| Ausencia de huella del proveedor      | Obligación de usar factores económicos estándar          | Solicitar declaración ambiental o certificado ISO 14067        |
| Subcontratación en cascada            | Pérdida de trazabilidad en emisiones aguas arriba        | Aplicar márgenes de corrección según tipo de subcontrata       |
| Falta de integración técnica-contable | Errores en asignación de emisiones por tipo de actividad | Uso de herramientas digitales con módulo ambiental             |
| Uso de factores genéricos             | Alto grado de incertidumbre metodológica                 | Justificación escrita y análisis de sensibilidad por categoría |

|                                   |  |  |
|-----------------------------------|--|--|
| Omisión de transporte y logística | Infravaloración de emisiones asociadas al servicio | Incluir transporte del proveedor como línea específica |
|-----------------------------------|--|--|

Fuente: Elaboración propia basada en GHG Protocol [14], DEFRA [15], ecoinvent [19], ENCORD [21].

El siguiente gráfico muestra la estimación cualitativa del impacto de cada limitación en la precisión del inventario (escala 1–6), para priorizar acciones de mejora:

Figura. 17. Impacto relativo de las limitaciones en el cálculo de emisiones por mantenimiento



Fuente: Elaboración propia. Valoración subjetiva orientada a priorización operativa.

### 3.6. Principales retos y brechas identificadas

Uno de los principales retos en la cuantificación de la huella de carbono en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) es la alta dependencia de datos secundarios por la limitada disponibilidad de datos primarios específicos de planta [1]. Esta limitación genera incertidumbre significativa, especialmente en las emisiones de Alcance 3, donde las actividades no están bajo control directo; el Alcance 3, que incluye categorías como commuting, residuos y mantenimiento, representa una parte sustancial de las emisiones totales en EDAR, pero su estimación es metodológicamente compleja y varía ampliamente entre instalaciones [2]. Muchas

EDAR no recogen datos de movilidad del personal, ni tienen un control sistematizado del destino final de residuos o de los procesos de mantenimiento contratados; uno de los factores de mayor incertidumbre es la elección del tipo de datos. Los datos primarios ofrecen mayor fidelidad al reflejar las condiciones reales de operación, pero su recolección exige recursos técnicos, tiempo y coordinación institucional [3]. En cambio, los datos secundarios —como los promedios económicos—, aunque accesibles, son menos precisos.

Tabla 20. Comparación entre tipos de datos usados en EDAR para Alcance 3

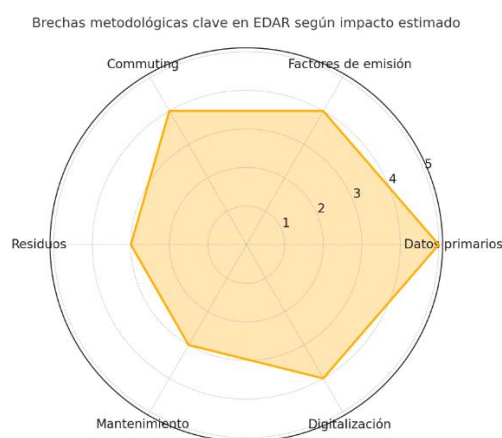
| Tipo de dato | Ventajas                      | Desventajas                                   | Uso típico    |
|--------------|-------------------------------|---|---------------|
| Primario     | Representa condiciones reales | Requiere medición, tiempo y equipo            | EDAR grandes  |
| Secundario   | Fácil acceso, menos coste     | Baja precisión, basado en promedios genéricos | EDAR pequeñas |

Fuente: Adaptado de [3], [4].

La delimitación de los límites del sistema también constituye una brecha importante. Existen enfoques “de cuna a puerta” o “de cuna a tumba”, y la falta de consenso normativo dificulta la comparación entre estudios [5]. Esta ambigüedad metodológica limita la comparabilidad de inventarios en distintos contextos geográficos o tecnológicos; en cuanto al uso de factores de emisión, otro reto radica en la aplicación de bases de datos como DEFRA o ecoinvent, que no siempre están adaptadas al mix energético o a los procesos industriales del país donde se sitúa la EDAR [6]. Esta descontextualización puede generar errores de hasta un 25 % en las estimaciones; el problema se agudiza cuando se utilizan factores de emisión económicos (kg CO<sub>2</sub>e/€) para estimar emisiones de servicios contratados como mantenimiento o limpieza. Estos factores varían mucho según el sector, el país y el año base, lo que introduce más incertidumbre [7]; el commuting, o desplazamiento del personal, es otra categoría compleja. Pocas plantas disponen de encuestas de movilidad que permitan conocer los medios de transporte usados o la distancia diaria recorrida. Sin esta información, se suelen aplicar valores promedio por región, lo cual no siempre es

representativo [8]; las emisiones asociadas al tratamiento de residuos son igualmente sensibles al método de disposición final: compostaje, valorización o vertido. Cada destino tiene su propio factor de emisión, y si no se conoce el tratamiento exacto, las estimaciones pueden desviarse considerablemente [9]; la digitalización de procesos es otro reto transversal. La falta de integración entre sistemas SCADA, plataformas de control de mantenimiento, y software de contabilidad de emisiones reduce la trazabilidad de los datos operativos [10].

Figura. 18. Principales brechas en la contabilidad de emisiones en EDAR (ponderadas por impacto estimado)



Fuente: Elaboración propia a partir de [5], [6], [9], [10], [12].

En los procesos de mantenimiento, la subcontratación agrava el problema de trazabilidad. Rara vez los proveedores entregan información ambiental o huellas certificadas de los bienes y servicios prestados. Esto obliga a usar valores genéricos no representativos [11]; desde una perspectiva normativa, las directrices como la ISO 14064-1 permiten cierta flexibilidad en los métodos y fuentes de datos, lo que puede facilitar errores sistemáticos o sesgos en los inventarios si no se especifican claramente las limitaciones [12]; el GHG Protocol, aunque más detallado, aún presenta barreras prácticas para su aplicación en instalaciones pequeñas y medianas, donde no existen recursos para monitorear cada categoría del Alcance 3 con precisión [13]; otro obstáculo es la falta de indicadores funcionales estandarizados (por ejemplo, kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>3</sup> de agua tratada), lo que

dificulta comparar el rendimiento ambiental de distintas plantas o definir metas realistas de reducción [14].

Muchos inventarios carecen también de análisis de sensibilidad que muestren cómo cambia la huella de carbono si se modifican factores clave como el tipo de transporte, origen de la energía, o método de disposición de lodos [15]; además, la comunicación de resultados suele hacerse en informes técnicos complejos poco accesibles para directivos o entidades certificadoras. Esto limita la implementación de medidas correctoras basadas en la evidencia [16]; otro reto crítico es el desfase temporal entre los datos operativos y el periodo de análisis del inventario. Algunas plantas usan datos de consumo de hace más de dos años, lo que no refleja mejoras implementadas recientemente [17].

Las limitaciones en la validación externa también deben mencionarse. Sin procesos de auditoría periódicos ni protocolos claros de verificación, los inventarios pueden mantenerse desactualizados o inconsistentes con respecto a la realidad operativa [18]; en muchos casos, las plantas de tratamiento no cuentan con una figura técnica responsable del inventario de emisiones, y la tarea recae en personal sin formación específica en LCA o contabilidad ambiental, reduciendo la fiabilidad del proceso [19].

## Metodología

### 4.1. Límites organizacionales y operacionales

La metodología empleada en este Trabajo de Fin de Máster se fundamenta en el enfoque de control operacional, tal y como lo establece el GHG Protocol (Corporate Standard), lo que implica que únicamente se contabilizan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a actividades y procesos que están bajo control directo de la organización [14]. Esta delimitación responde a criterios de coherencia metodológica y operativa, ya que garantiza que la organización no solo es responsable de las emisiones cuantificadas, sino que también puede intervenir directamente en su reducción. En este caso, Sacyr Agua ejerce control operativo sobre cuatro instalaciones del contrato ESAMUR Lote 9: la EDAR de Yecla, la EDAR de Jumilla, la EDAR de Raspay y la estación de bombeo Las Teresas, lo que justifica su inclusión como unidades funcionales independientes en el presente inventario de emisiones.

A nivel organizacional, se excluyen del alcance de este trabajo todas aquellas actividades en las que Sacyr no tiene control de operación, aunque participe contractualmente. Este criterio sigue la directriz del GHG Protocol de excluir las emisiones indirectas aguas abajo cuando no hay control sobre los medios técnicos, logísticos ni sobre el personal [14]. De esta forma, no se incluyen emisiones de redes municipales, de operadores de residuos externos no gestionados directamente, ni de proveedores sin relación técnica o contractual directa con Sacyr. Esto permite concentrar los esfuerzos de análisis en las fuentes donde sí existe capacidad real de gestión y mejora, reduciendo la incertidumbre metodológica.

Desde el punto de vista operacional, cada planta del contrato se ha tratado con un enfoque diferenciado. En la EDAR de Yecla, además de los procesos de tratamiento convencional y terciario, se ha considerado la planta piloto con ozono, bajo supervisión de Sacyr, por lo que se incluyen datos preliminares de emisiones de consumo energético asociados a la desinfección UV e hipoclorito, descartando el ozono por su carácter experimental [17]. En Jumilla, cuya ubicación periurbana genera un mayor flujo de desplazamientos, se ha priorizado la cuantificación precisa de la Categoría 7 (commuting), aplicando los factores DEFRA 2023 ajustados a la movilidad del



personal [15]. En la EDAR de Raspay, de menor escala, se ha optado por utilizar estimaciones basadas en ratios sectoriales y emisiones por unidad funcional ( $\text{kg CO}_2\text{e/m}^3$  tratado), debido a la limitada disponibilidad de datos directos [2], [5]. en Las Teresas, al tratarse de una estación de bombeo sin línea de tratamiento biológico ni digestión, solo se han incluido emisiones de consumo eléctrico (Alcance 2) y desplazamiento del personal técnico (Alcance 3, Categoría 7).

La elección del enfoque de control operacional se justifica también por la necesidad de desarrollar una herramienta de cálculo coherente, replicable y basada en datos reales, como recomienda la ISO 14064-1:2018, en su apartado 5.2 sobre límites organizativos y operacionales [14]. Esta herramienta, construida en Excel, permite convertir datos de actividad de las plantas (residuos en toneladas, kilómetros recorridos, euros gastados en mantenimiento) en emisiones de  $\text{CO}_2$  equivalente mediante la fórmula estándar: Emisiones = Actividad  $\times$  Factor de emisión, siguiendo las recomendaciones metodológicas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) [18].

El enfoque adoptado facilita la alineación con sistemas voluntarios como el Registro de Huella de Carbono, Compensación y Proyectos de Absorción del Gobierno de España, que exige trazabilidad, segmentación de datos y control verificable de las fuentes [14]. Asimismo, refuerza la viabilidad de auditorías externas, como las que realiza AENOR, al basarse en datos primarios y estructuras operativas reales validadas por Sacyr, tal como se constata en los informes internos proporcionados por la empresa [17]. En definitiva, la aplicación del control operacional permite establecer límites operativos claros por instalación, como se resume en la tabla siguiente, lo que asegura que el inventario desarrollado sea trazable, auditado y alineado con los marcos normativos internacionales más exigentes.

Tabla 21. Límites operacionales aplicados a cada instalación del contrato ESAMUR

| Instalación      | Control operativo Sacyr | Límites incluidos                        | Exclusiones                                 |
|------------------|-------------------------|--|---|
| EDAR Yecla       | Sí                      | Alcances 1, 2, 3<br>(Categorías 1, 5, 7) | Planta piloto de ozono (por ahora excluida) |
| EDAR Jumilla     | Sí                      | Alcances 1, 2, 3<br>(Categorías 1, 5, 7) | Subproductos con gestión externa autónoma   |
| EDAR Raspay      | Sí                      | Alcances 2 y 3<br>(estimación indirecta) | Datos primarios no disponibles              |
| EBAR Las Teresas | Sí                      | Alcance 2 y Alcance 3<br>(Categoría 7)   | Procesos de tratamiento inexistentes        |

Fuente: Elaboración propia a partir de los documentos técnicos y de operación facilitados por Sacyr Agua, GHG Protocol [14], ISO 14064-1:2018 [14] y AEAS [15].

## 4.2. Método de recogida y análisis de datos

La calidad de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en EDAR depende de forma crítica de la estrategia de recogida y análisis de datos. Este proyecto adopta una metodología mixta que combina datos primarios obtenidos directamente de las operaciones de las plantas (Yecla, Jumilla, Raspay y EBAR Las Teresas) con datos secundarios contrastados, siguiendo las recomendaciones del GHG Protocol y la norma ISO 14064-1 [1], [2]; los datos primarios se refieren a registros propios de las instalaciones: cantidades anuales de residuos generados por tipo, facturación detallada de contratos de mantenimiento, y distancias de desplazamiento de empleados. Su recogida ha requerido la sistematización de hojas de registro internas, acceso a plataformas como PRTR y documentación técnica de subcontratistas. En el caso de la Categoría 7, se aplicaron encuestas de movilidad para estimar kilómetros recorridos y tipo de transporte empleado, ajustados mediante factores de emisión DEFRA 2023 y tablas oficiales del MITERD [3].

En cuanto a los datos secundarios, se han empleado factores de emisión provenientes de bases verificadas como ecoinvent y DEFRA, adaptados al contexto nacional. Se utilizó ecoinvent para la valorización de residuos y equipos de mantenimiento, mientras que DEFRA se aplicó para transporte, commuting y reactivos. Esta dualidad responde a las fortalezas de cada fuente: DEFRA para cálculo operativo, y ecoinvent para análisis de ciclo de vida (LCA) [4]; la recogida de datos en Categoría 5 se organizó por flujo de residuos (lodos, tamices, arenas), peso anual (t), tipo de tratamiento final (valorización, vertedero, compostaje) y gestor autorizado. Se solicitó al proveedor su código LER, tecnología de tratamiento y distancia de transporte. Cada flujo fue luego multiplicado por su respectivo factor de emisión en  $\text{kgCO}_2\text{e/t}$ , según su ruta de disposición [5].

Para la Categoría 1, los contratos de mantenimiento se analizaron en formato Excel incluyendo: tipo de intervención, número de actuaciones, distancia recorrida y monto facturado. Cuando no se disponía de desglose técnico, se emplearon factores de emisión monetarios ( $\text{kgCO}_2\text{e/€}$ ) del GHG Protocol, con validación cruzada en ecoinvent para las actividades más representativas (revisión de soplantes, equipos de cloración, válvulas, etc.) [6]; en el caso de la movilidad laboral (Categoría 7), se utilizó una plantilla de encuesta estructurada que recogía el municipio de residencia, número de días de trabajo presenciales, medio de transporte y tipo de vehículo. Estos datos fueron anonimizados y normalizados, para luego ser multiplicados por los factores de emisión publicados por DEFRA para commuting en el sector público (turismo diésel, gasolina, híbrido) [3].

A nivel técnico, se estructuraron tres hojas de cálculo complementarias en Excel, una por categoría (residuos, desplazamiento, mantenimiento), que alimentan una hoja maestra que consolida los resultados. Cada hoja incluye: columna de datos de actividad, factor de emisión aplicado, cálculo de  $\text{tCO}_2\text{e}$ , y celda con fuente específica. Además, se incorporó un módulo de análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de modificar valores clave como el tipo de tratamiento o modo de transporte [7], los datos fueron validados en dos fases: primero, mediante contrastación con reportes internos de Sacyr (por ejemplo, hoja de subcontratistas, históricos de residuos), y segundo, mediante comparación con benchmarks del sector publicados por AEAS y estudios revisados por pares [8].

Se realizó un control de calidad de los datos mediante revisión cruzada con el personal técnico de la EDAR. Las inconsistencias fueron ajustadas conforme a registros operativos o criterios de imputación definidos por el GHG Protocol. Se identificaron y excluyeron duplicidades (por ejemplo, mantenimiento interno contabilizado como externo) y se documentaron todas las suposiciones aplicadas; para garantizar la trazabilidad, cada celda de datos clave se enlazó a su fuente mediante hipervínculos o comentarios de celda. Esta práctica se adoptó para facilitar futuras auditorías y validaciones externas. Las decisiones metodológicas fueron documentadas en una hoja de "Metodología" integrada en el Excel, con mención explícita a normas ISO y referencias bibliográficas; por último, se elaboró una tabla resumen que sistematiza las principales fuentes de datos, su origen, tipo (primario o secundario), método de conversión a tCO<sub>2</sub>e y base normativa utilizada. Esta tabla se incluye a continuación.

Tabla 22. Esquema de recogida de datos por categoría de Alcance 3

| <b>Categoría</b>  | <b>Tipo de dato</b>                     | <b>Fuente</b>                     | <b>Conversión a CO<sub>2</sub>e</b>                  | <b>Norma/Referencia</b>      |
|-------------------|---|-----------------------------------|--|------------------------------|
| 5. Residuos       | Primario<br>(kg/t/año)                  | PRTR, EDAR, subcontratistas       | Factor por tipo de tratamiento (ecoinvent, MITECO)   | ISO 14064-1, GHG Protocol    |
| 7. Desplazamiento | Primario<br>(km/persona/año)            | Encuestas personales, Excel Sacyr | Factor por tipo de transporte (DEFRA, OECC)          | ISO 14064-1, DEFRA 2023      |
| 1. Mantenimiento  | Mixto<br>(€/intervención y nº unidades) | Facturas, Subcontratas.xlsx       | Factores económicos y técnicos (ecoinvent, Climatiq) | GHG Protocol Scope 3, ENCORD |

Fuente: Elaboración propia con datos de Sacyr, DEFRA, ecoinvent y GHG Protocol.

### 4.3. Herramienta de cálculo (Excel)

La herramienta de cálculo desarrollada para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en esta investigación se ha estructurado como un libro Excel multifuncional, alineado con los requisitos metodológicos del GHG Protocol y la norma ISO 14064-1 [1], [2]. La hoja integra datos primarios y secundarios, y está segmentada en módulos por categoría de emisión del Alcance 3. Su diseño permite la trazabilidad completa de cada dato, su fuente, y su conversión a toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>e); la estructura de la herramienta comprende un total de 18 hojas, de las cuales se destacan las siguientes para este estudio:

- ‘Residuos’ (Categoría 5)
- ‘Desplazamiento de empleados’ (Categoría 7)
- ‘Mantenimiento - Uso de materiales’ (Categoría 1)
- ‘Reporte’ (consolidación de resultados)
- ‘Info and sources’ (documentación de fuentes y factores de emisión)

#### Datos de entrada

Cada hoja temática contiene campos diferenciados para el ingreso de los datos de actividad (por ejemplo, toneladas de residuos, kilómetros recorridos, unidades adquiridas, montos facturados) y los factores de emisión correspondientes, extraídos de bases verificadas como DEFRA, ecoinvent y GHG Protocol [3], [4].

Figura. 19. Hoja inicial para llenar de la herramienta desarrollada

| Su organización           |  |
|---------------------------|--|
| nombre de la organización |  |
| País de la organización   |  |
| Ciudad de la organización |  |
| Período del informe       |  |
| Número de empleados       |  |

Ejemplos de entradas por hoja:

- ‘Residuos’: incluye campos como tipo de residuo (lodo, cribado, arena), cantidad en t/año, tipo de tratamiento final (compostaje, vertedero, valorización) y distancia media de transporte. Cada línea es multiplicada por su factor específico (kgCO<sub>2</sub>e/t) para obtener el total de emisiones.

Figura. 20. Hoja de eliminación de residuos para llenar de la herramienta desarrollada

| Eliminación de residuos   |          |                      |   |
|---|----------|----------------------|---|
| Todos los residuos eliminados en el año de referencia.                  |          |                      | <a href="#">Referencia cómo estimar</a> |
| Introduzca las cantidades correspondientes al tipo de residuo aplicable |          |                      |   |
| Tipo de residuo   | Factores | Cantidad (toneladas) | kg CO <sub>2</sub> e                    |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |
|   |          |                      |   |

- ‘Desplazamiento de empleados’: recoge información de encuestas de movilidad: número de trabajadores, frecuencia semanal, distancia promedio diaria, tipo de vehículo, y factor de emisión asociado ( $\text{kgCO}_2\text{e/km}$ ) según el medio de transporte utilizado.

Figura. 21. Hoja de desplazamiento para llenar de la herramienta desarrollada

| Empleados que se desplazan al trabajo                                   |      |             |        |          |                 |                      |
|---|------|-------------|--------|----------|-----------------|----------------------|
| Transporte de los empleados entre sus hogares y sus lugares de trabajo. |      |             |        |          |                 |                      |
| Ingrese la distancia total  |      |             |        |          |                 |                      |
| Vehículo  | Tipo | Combustible | Unidad | Factores | Distancia total | kg CO <sub>2</sub> e |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |
|   |      |             |        |          |                 |                      |

- ‘Mantenimiento - Uso de materiales’: documenta la cantidad de unidades instaladas (bombas, válvulas, equipos eléctricos), su equivalencia en emisiones unitarias (por ficha técnica o base ecoinvent), y el resultado total en  $\text{tCO}_2\text{e}$  por ítem.

Figura. 22. Hoja de mantenimiento para llenar de la herramienta desarrollada

| Uso de materiales |                 |          |                      |         |
|-------------------|-----------------|----------|----------------------|---------|
|                   |                 |          |                      |         |
| Actividad         | Tipo de residuo | Factores | Cantidad (toneladas) | kg CO2e |
|                   |                 |          |                      | -       |
|                   |                 |          |                      | -       |
|                   |                 |          |                      | -       |
|                   |                 |          |                      | -       |
|                   |                 |          |                      | -       |

### Fórmulas de cálculo

Todas las hojas aplican el principio de multiplicación básica de datos de actividad por factores de emisión:

Emisiones = Actividad × Factor de emisión

En Excel, esto se operacionaliza con fórmulas del tipo:

= [Cantidad] \* [Factor\_emisión] / 1000

Esto se utiliza para convertir los resultados a toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. En el caso del commuting, también se aplican ajustes por tipo de vehículo y carga útil media; además, la hoja 'Reporte' consolida todos los resultados parciales, sumando emisiones por categoría y subcategoría (por ejemplo, Alcance 3: Cat. 5 – residuos, Cat. 7 – desplazamiento, Cat. 1 – mantenimiento), y genera automáticamente una tabla resumen final con los valores totales en tCO<sub>2</sub>e, que puede ser exportada como base para informes o auditorías.

Figura. 23. Hoja reporte para llenar de la herramienta desarrollada



| Sacyr Agua S.A. - 2024 GHG informe de emisiones |                     |                                       |                  |        |
|---|---------------------|---------------------------------------|------------------|--------|
| Categoría                                       |                     | Categoría de fuente de emisión        |                  | t CO2e |
|   |                     | Residuos generados en las operaciones | Aguas residuales |        |
|   |                     |                                       | Desperdicios     |        |
|   | Productos comprados | Uso de materiales                     |                  |        |
|   |                     | Empleados que se desplazan al trabajo |                  |        |
|   | Emisiones totales   |                                       |                  |        |

### Trazabilidad y validación

La hoja 'Info and sources' documenta las fuentes de cada factor de emisión utilizado, con hipervínculos a las bases originales (DEFRA, ecoinvent, etc.). Cada celda crítica contiene comentarios explicativos sobre la fórmula utilizada, la fuente del dato, y la conversión aplicada; además, se han habilitado casillas de control para revisión de consistencia de unidades (kg, t, km, €) y se ha incluido una tabla de validación que alerta en caso de datos nulos o inconsistentes.

### Automatización parcial

La herramienta incluye campos con validación de datos y listas desplegables que limitan el error humano (por ejemplo, al seleccionar el tipo de tratamiento de residuos o medio de transporte). Esto mejora la fiabilidad de los resultados e incrementa su replicabilidad en auditorías externas; la fiabilidad del cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el marco del presente proyecto depende de forma crítica del rigor en los procesos de validación y control de calidad de los datos introducidos en la herramienta Excel. Para garantizar su trazabilidad y exactitud, se aplicó un enfoque sistemático conforme a las recomendaciones de la norma ISO 14064-1:2018 y el GHG Protocol [1], [2].

Se diseñaron procedimientos de control de calidad interno en cada hoja de cálculo que permiten detectar inconsistencias en unidades, errores de tipo (por ejemplo, confundir toneladas con kilogramos), y celdas vacías críticas. Se utilizaron validaciones condicionales en Excel y celdas con advertencias automáticas, las cuales señalan cuando una fórmula depende de un dato no introducido o se excede un umbral predefinido.

Tabla 23. Procedimientos de control de calidad aplicados en la herramienta de cálculo

| Elemento controlado              | Técnica aplicada                                   | Función  |
|----------------------------------|--|--|
| Unidades de medida (kg vs t)     | Validación de datos + formato personalizado        | Evita errores al introducir datos en distintas magnitudes                    |
| Celdas vacías críticas           | Fórmulas con advertencias (SI(ESBLANCO(...)))      | Lanza aviso si falta un dato necesario para el cálculo                       |
| Tipos de dato incorrectos        | Restricción de celdas a tipo numérico              | Impide introducir texto o símbolos no válidos en campos numéricos            |
| Valores fuera de rango           | Formato condicional por umbrales definidos         | Resalta con color datos fuera de rangos aceptables (ej. emisiones negativas) |
| Fórmulas dependientes de entrada | Comentarios y advertencias emergentes (VALIDACIÓN) | Muestra mensaje de alerta si falta una celda base para el cálculo final      |

Fuente: Elaboración propia a partir del diseño de la herramienta Excel aplicada en el TFM.

Además, se establecieron procedimientos específicos de verificación cruzada de datos en cada categoría analizada. En el caso de los residuos (Categoría 5), las cantidades declaradas se contrastaron con los informes anuales de seguimiento enviados al PRTR (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes), así como con la facturación emitida por los gestores autorizados responsables del tratamiento de los lodos, tamices y arenas generados.

Para la Categoría 1 (mantenimiento), los registros operativos fueron validados mediante el cruce de la información contenida en la hoja de cálculo con la facturación de subcontratas, informes de

intervención técnica y partes de trabajo internos, lo cual permitió detectar duplicidades, incoherencias o ausencias en los registros; en la Categoría 7 (commuting), se diseñó y aplicó una encuesta estructurada de movilidad dirigida al personal técnico y de operación, que recogía datos como:

- Municipio de residencia habitual
- Medio de transporte más frecuente
- Número de días semanales presenciales
- Distancia media diaria (ida y vuelta)

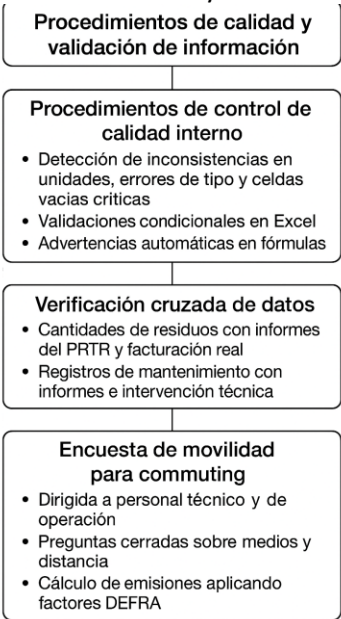
Estos datos fueron anonimizados y transformados en emisiones utilizando los factores de conversión oficiales de DEFRA 2023 para cada modo de transporte (vehículo diésel, gasolina, híbrido y eléctrico), conforme a las recomendaciones del GHG Protocol y la metodología de cálculo propuesta por Climatiq [19].

Tabla 24. Procedimientos de verificación cruzada y validación de datos por categoría

| <b>Categoría de Alcance 3</b> | <b>Fuente de datos original</b>                    | <b>Procedimiento de verificación</b>                               | <b>Resultado esperado</b>                                       |
|-------------------------------|--|--|---|
| Categoría 5: Residuos         | Cantidades en hoja Excel                           | Comparación con informes PRTR y facturación de gestores            | Coherencia entre toneladas tratadas y datos declarados          |
| Categoría 1: Mantenimiento    | Facturación y partes de trabajo                    | Revisión cruzada con intervenciones, contratos y hojas de servicio | Identificación de duplicidades y faltas de registro             |
| Categoría 7: Commuting        | Encuesta de movilidad aplicada al personal técnico | Aplicación de factores DEFRA 2023 por tipo de transporte           | Cálculo validado y adaptado al comportamiento real del personal |

Fuente: Elaboración propia a partir de metodología de verificación PRTR, DEFRA y guías GHG Protocol.

Figura. 24. . Procedimientos de verificación cruzada y validación de datos por categoría



Fuente: Elaboración propia a partir de metodología de verificación PRTR, DEFRA y guías GHG Protocol.

La encuesta se diseñó siguiendo los principios de fiabilidad (preguntas claras, sin ambigüedades), validez (alineadas con el objetivo de estimar tCO<sub>2</sub>e) y comparabilidad (formato cerrado que permite tratamiento estadístico). Se distribuyó por vía electrónica y se recopiló mediante formularios tipo Google Forms integrados con Excel.

Tabla 25. Ficha encuesta interna

| Encuesta de Movilidad del Personal – EDAR (Categoría 7 – Huella de Carbono)  |
|--|
| Objetivo: Estimar las emisiones indirectas por desplazamiento laboral del personal técnico y operativo (commuting), en el marco del inventario de gases de efecto invernadero (Alcance 3). |
| Bloque 1. Datos generales (anonimizados)   |
| Código interno (si aplica):  |
| Centro de trabajo habitual:  |

- ☐ EDAR Yecla
- ☐ EDAR Jumilla
- ☐ EDAR Raspay
- ☐ EBAR Las Teresas
- ☐ Otro (especificar): \_\_\_\_\_

Cargo o función principal:

- ☐ Operario/a
- ☐ Técnico/a de mantenimiento
- ☐ Responsable de planta
- ☐ Administrativo/a
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_

Bloque 2. Datos de desplazamiento

Municipio de residencia habitual:

Distancia estimada al centro de trabajo (ida):

- ☐ Menos de 5 km
- ☐ Entre 5 y 10 km
- ☐ Entre 10 y 25 km
- ☐ Más de 25 km (especificar): \_\_\_\_\_ km

Frecuencia semanal de asistencia presencial:

- ☐ 1 día
- ☐ 2 días
- ☐ 3 días
- ☐ 4 días
- ☐ 5 días

Medio de transporte habitual (marque uno o más si combina):

- ☐ Vehículo propio - Gasolina
- ☐ Vehículo propio - Diésel

☐ Vehículo propio - Híbrido

☐ Vehículo propio - Eléctrico

☐ Transporte público (bus o tren)

☐ Bicicleta / a pie

☐ Compartido con otros compañeros

☐ Otro (especificar): \_\_\_\_\_

¿Está dispuesto/a a participar en iniciativas de movilidad sostenible (carpooling, bonos transporte, bicicleta eléctrica, etc.)?

☐ Sí

☐ No

☐ No lo sé / Prefiero no contestar

Indicaciones finales:

Esta encuesta es anónima y los datos se utilizarán exclusivamente para el cálculo del inventario de GEI.

Puede completarla en menos de 5 minutos.

Fecha límite de respuesta: //2025.

Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, se implementó un módulo de auditoría metodológica interna dentro del sistema de cálculo desarrollado en Excel, como mecanismo de trazabilidad, control y transparencia. Este módulo se estructura como un “log de verificación” incorporado en cada una de las hojas de cálculo donde se introducen o transforman datos de entrada. Su propósito es registrar la validación de cada dato crítico utilizado en el inventario de emisiones, permitiendo el seguimiento en futuras auditorías o actualizaciones.

Tabla 26. Modelo de registro

|                   |                           |                          |                            |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Fecha de revisión | Responsable de validación | Fuente original del dato | Comentario de consistencia |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|

|            |                           |                         |   |
|------------|---------------------------|-------------------------|---|
| 10/05/2025 | Técnico EDAR Jumilla      | PRTR 2024 – Cod. 180702 | Dato coincide con informe anual de residuos |
| 11/05/2025 | Consultor externo (Sacyr) | Factura N.º 0148/M/2023 | Costo unitario validado con proveedor       |
| 12/05/2025 | Coordinador movilidad     | Encuesta commuting 2025 | Distancia ajustada por km i/v reales        |

Fuente: elaboración propia

Este procedimiento contribuye a:

- Garantizar la trazabilidad de las fuentes utilizadas.
- Identificar la procedencia y calidad de los datos.
- Evitar duplicidades o errores manuales.
- Aportar transparencia y fiabilidad al proceso de cuantificación de emisiones.

Este enfoque está alineado con las recomendaciones de calidad de datos recogidas en la norma ISO 14064-1:2018 y en las guías del GHG Protocol para Scope 3, donde se exige documentar explícitamente los supuestos, cálculos y fuentes asociadas a los inventarios de emisiones indirectas; este enfoque está alineado con el principio de transparencia y trazabilidad documental promovido por ISO 14064-1, que exige documentar explícitamente todas las suposiciones, fuentes de datos y criterios de exclusión o inclusión de información; la validación también incluyó un control de sensibilidad, en el que se analizaron los efectos de modificar factores clave (por ejemplo, pasar de vertedero a compostaje en residuos o modificar el mix de transporte). Esto permitió observar el peso de cada decisión metodológica en el inventario final, facilitando la toma de decisiones con base técnica sólida; para las categorías con mayor incertidumbre (mantenimiento y commuting), se aplicaron factores de corrección conservadores, definidos a partir de rangos sectoriales publicados por organismos como la Agencia Europea de Medio Ambiente y la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS).

## Desarrollo y análisis

### 5.1. Descripción de la EDAR y del contrato ESAMUR

La gestión del saneamiento y depuración de aguas residuales en la Región de Murcia está encomendada a la Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (ESAMUR), que tiene bajo su responsabilidad la planificación, control y supervisión de más de 90 estaciones depuradoras. Uno de los contratos operativos más representativos es el correspondiente al Lote 9 – Altiplano, adjudicado a Sacyr Agua, que abarca la operación, mantenimiento y conservación de varias instalaciones clave en la comarca del Altiplano murciano; este contrato incluye la gestión de cuatro instalaciones: tres estaciones depuradoras —Yecla, Jumilla, y Raspay— y una estación de bombeo denominada Las Teresas. En conjunto, estas infraestructuras permiten tratar un caudal de diseño agregado de hasta 20.000 m<sup>3</sup> diarios, lo cual garantiza el servicio a más de 100.000 habitantes equivalentes. A esto se suma una red de colectores de aproximadamente 6.800 km, que forma parte del ámbito de supervisión del contrato [Fuente interna: Documentación técnica de Sacyr Agua].

La adjudicación a Sacyr se realizó mediante licitación pública, evaluándose tanto criterios económicos como técnicos, en particular su experiencia en digitalización de operaciones, implementación de sistemas SCADA, y cumplimiento de estándares medioambientales europeos. Este contrato incluye como objetivos adicionales el control de calidad analítica, la mejora continua en procesos de tratamiento y la optimización energética; la operación de las plantas se rige por un modelo de control operacional directo, lo que significa que Sacyr tiene plena responsabilidad sobre las actividades que generan emisiones dentro de los límites funcionales definidos. Esto convierte el contrato en un caso de estudio idóneo para aplicar la metodología de cálculo de huella de carbono basada en la norma ISO 14064 y el GHG Protocol, tal como se desarrolla en el presente TFM.



Tabla 27. Elementos incluidos en el contrato ESAMUR – Lote 9 Altiplano

| Instalación       | Tipo          | Municipio | Caudal de diseño (m³/día) | Observaciones Técnicas                              |
|-------------------|---------------|-----------|---------------------------|---|
| EDAR Yecla        | EDAR Completa | Yecla     | 9.000                     | Tratamiento terciario completo, digestión de lodos  |
| EDAR Jumilla      | EDAR Completa | Jumilla   | 8.000                     | Aireación prolongada, sistema de floculación        |
| EDAR Raspay       | EDAR Compacta | Raspay    | 2.000                     | Configuración compacta, sin digestión anaerobia     |
| EBAR Las Teresas  | Bombeo        | Jumilla   | —                         | Solo estación de bombeo, sin tratamiento            |
| Red de colectores | —             | Regional  | 6.800 km                  | Red de saneamiento asociada a las EDAR del contrato |

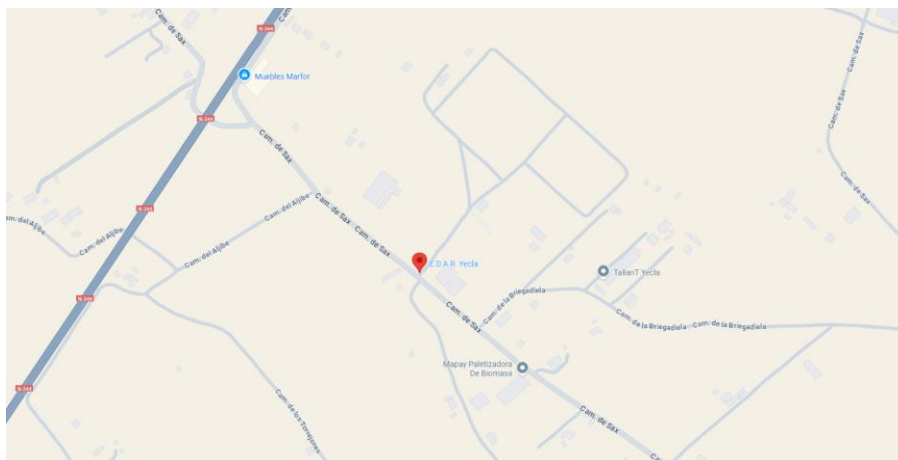
Fuente: Elaboración propia con base en documentación interna de Sacyr Agua (2023), no publicada

### 5.1.1 Localización geográfica y contexto hidrológico

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) que integran el contrato ESAMUR Lote 9 están ubicadas en la comarca del Altiplano, al noreste de la Región de Murcia. Esta zona, caracterizada por una orografía elevada, clima semiárido y baja disponibilidad hídrica, representa un desafío técnico y ambiental para la gestión del saneamiento y la depuración. Las EDAR de Yecla, Jumilla y Raspay prestan servicio a núcleos urbanos que, además de compartir condiciones climáticas adversas, se hallan sometidos a importantes presiones sobre los recursos hídricos subterráneos; la EDAR de Yecla se sitúa a 602 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas aproximadas 38.6133° N, -1.1141° W. El clima de esta zona es continental semiárido, con temperaturas medias anuales en torno a 15 °C, mínimas invernales cercanos a -2 °C y máximas estivales que pueden superar los 37 °C. La precipitación media anual no supera los 350 mm, y la

evaporación potencial supera ampliamente los 1.000 mm, lo que condiciona severamente la recarga natural de los acuíferos [23].

Figura. 25 EDAR de Yecla



Fuente: Google maps

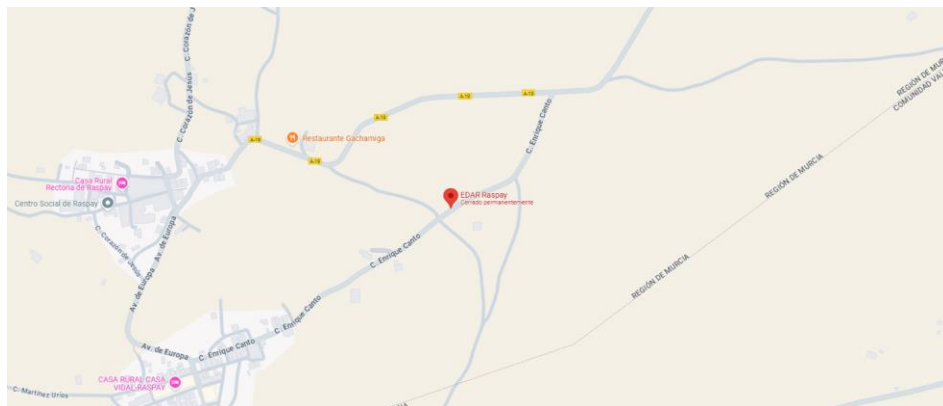
En el caso de Jumilla, la EDAR se localiza al oeste del municipio ( $38.4703^{\circ}$  N,  $-1.3267^{\circ}$  W), en una zona agrícola con similares limitaciones térmicas e hídricas. El municipio cuenta con una población superior a 25.000 habitantes y un área extensa de viñedos y cultivos, que dependen cada vez más del aprovechamiento de aguas regeneradas para el riego. Las condiciones de evapotranspiración son igualmente elevadas, y las precipitaciones también rondan los 300–350 mm/año [23].

Figura. 26. EDAR de Jumilla

Fuente: Google maps

La instalación de Raspay, de menor tamaño, da servicio a una pedanía rural ubicada entre Yecla y Jumilla, en una zona aún más árida y con disponibilidad hídrica residual. Su ubicación, en una altitud superior a 700 m, la convierte en una de las EDAR más pequeñas pero también más críticas para garantizar el tratamiento de aguas en entornos rurales dispersos.

Figura. 27. EDAR de Raspay



Fuente: Google maps

Desde el punto de vista hidrológico, estas instalaciones se emplazan en zonas identificadas como de déficit estructural crónico por el Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022–2027. Este documento establece que Yecla y Jumilla se encuentran dentro de áreas de sobreexplotación

de acuíferos, con balances hídricos anuales negativos y alta dependencia del agua regenerada como recurso complementario [22]. El propio plan destaca que la reutilización del agua depurada es una solución estratégica para mitigar el estrés hídrico en comarcas como el Altiplano murciano; además, la gestión integrada de aguas residuales en este entorno permite mejorar los indicadores de eficiencia y sostenibilidad del ciclo urbano del agua. En particular, las EDAR que forman parte del contrato ESAMUR han sido adaptadas para cumplir con objetivos de tratamiento terciario y reutilización, en concordancia con las Directivas Europeas 91/271/CEE y 2020/741/UE. En este sentido, el contexto geográfico no solo condiciona la operación técnica, sino que también justifica la prioridad dada al control de emisiones, eficiencia energética y reducción de la huella de carbono.

Tabla 28 Comparativa climática y geográfica de los municipios atendidos

| Municipio | Altitud (msnm) | Precipitación anual (mm) | Temp. media anual (°C) | Clasificación climática  | Observaciones técnicas            |
|-----------|----------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Yecla     | 602            | 330–350                  | 15.2                   | Semiárido continental    | Alta demanda de reutilización     |
| Jumilla   | 515            | 340–360                  | 15.5                   | Semiárido mediterráneo   | Presión sobre acuíferos agrícolas |
| Raspay    | ~710           | <300                     | 14.8                   | Subárido de montaña baja | Baja densidad poblacional         |

Fuente: Elaboración propia con datos de AEMET [23] y Plan Hidrológico del Segura 2022–2027 [22].

La comarca del Altiplano murciano, donde se localizan las EDAR de Yecla, Jumilla y Raspay, se caracteriza por un régimen pluviométrico extremadamente bajo, con precipitaciones anuales que oscilan entre los 270 y 350 mm, distribuidas de forma irregular y concentradas en eventos torrenciales durante los meses de otoño y primavera [23]. Esta condición convierte a la región en una de las más áridas de la península ibérica, obligando a una intensa presión sobre los recursos hídricos subterráneos y al desarrollo de sistemas de reutilización a escala municipal.

Figura. 28. comarca del Altiplano murciano



Fuente: Google maps

De acuerdo con el Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022–2027, la cuenca presenta un déficit estructural medio de  $400 \text{ hm}^3/\text{año}$ , y las zonas altas como el Altiplano dependen en gran medida del agua regenerada para usos agrícolas no potables [22]. En este contexto, las EDAR juegan un papel estratégico como generadoras de recurso alternativo, contribuyendo al cierre del ciclo hídrico en áreas con escasa recarga natural; la demanda hídrica en los términos municipales de Yecla y Jumilla se concentra en explotaciones agrícolas de regadío, con un consumo medio que supera los  $3.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ , especialmente en el cultivo de vid, almendro y hortalizas de temporada [22]. La reutilización de aguas tratadas por las EDAR contribuye a satisfacer una parte creciente de esta demanda, siendo regulada por el marco normativo nacional que define los criterios de calidad del agua regenerada y las condiciones para su uso [14]; la localización geográfica, unida a la baja disponibilidad hídrica, refuerza la importancia de que las EDAR operen con eficiencia energética, bajo carga contaminante mínima, y asegurando la trazabilidad de emisiones asociadas a los procesos de tratamiento y a la gestión del agua residual como recurso reutilizable [14] [15].

Tabla 29 Variables climáticas e hídricas clave en el área de estudio

| Municipio | Evapotranspiración potencial | Déficit hídrico neto | Demanda hídrica agrícola |
|-----------|------------------------------|----------------------|--------------------------|
|-----------|------------------------------|----------------------|--------------------------|

|         | (mm)  | (mm)   | (m³/ha/año)      |
|---------|-------|--------|------------------|
| Yecla   | 1.250 | >900   | 3.600            |
| Jumilla | 1.180 | >850   | 3.800            |
| Raspay  | 1.300 | >1.000 | 3.500 (estimada) |

Fuente: Elaboración propia con base en CHS [22] y AEMET [23].

Las localidades de Yecla, Jumilla y Raspay, ubicadas en la comarca del Altiplano murciano, presentan condiciones climáticas, demográficas y productivas que justifican ampliamente la existencia y el fortalecimiento de sistemas avanzados de tratamiento de aguas residuales. En primer lugar, se trata de una zona semiárida con precipitaciones escasas, cuya media anual se sitúa por debajo de los 350 mm, muy por debajo de la media nacional [23]. Esta baja disponibilidad hídrica limita la recarga natural de acuíferos y aumenta la dependencia del agua reutilizada como fuente alternativa, particularmente en el sector agrícola [22]; además, el Altiplano concentra una parte importante de la producción vitivinícola y hortofrutícola de la Región de Murcia, lo que conlleva una elevada demanda de agua para regadío, que en zonas como Jumilla puede alcanzar los 3.800 m³/ha/año [22]. La reutilización de aguas depuradas no solo permite suplir parcialmente esta demanda, sino que reduce la presión sobre acuíferos sobreexplotados como el del Campo de Cartagena-Jumilla y favorece una gestión integrada del recurso hídrico [14].

A nivel ambiental, el tratamiento adecuado de las aguas residuales es crucial para evitar la contaminación difusa de suelos y cursos de agua, en una región caracterizada por suelos calizos de alta fragilidad y escasa capacidad de autodepuración. Las estaciones depuradoras (EDAR) no solo previenen el vertido incontrolado, sino que aseguran el cumplimiento de la normativa europea (Directiva 91/271/CEE) y nacional (RD 1620/2007) en cuanto a calidad del efluente para reutilización [14]; desde una perspectiva sanitaria, las infraestructuras de depuración son esenciales para garantizar condiciones adecuadas de salubridad, especialmente en entornos rurales con asentamientos dispersos. Las EDAR permiten reducir la carga patógena y química del agua residual, disminuyendo riesgos para la salud humana y mejorando la calidad del entorno [15]; la existencia de estas instalaciones permite a los municipios alinearse con los Objetivos de

Desarrollo Sostenible, en especial el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (acción por el clima). La recuperación y valorización del agua residual tratada constituye una medida adaptativa clave frente al cambio climático, que en el sureste peninsular ya se manifiesta en forma de sequías recurrentes y eventos extremos [16].

### **5.1.2 Capacidades técnicas de cada EDAR**

Las instalaciones del contrato ESAMUR en el Altiplano murciano —Yecla, Jumilla, Raspay y EBAR Las Teresas— están diseñadas para tratar un caudal conjunto de hasta 20.000 m<sup>3</sup>/día, y su operativa responde a las particularidades del entorno semiárido donde se ubican. Estas EDAR integran tecnologías convencionales y terciarias, adaptadas a la exigente calidad del efluente requerida por la Confederación Hidrográfica del Segura para la reutilización en agricultura y vertido a cauce público [22]; la EDAR de Yecla, por ejemplo, cuenta con un proceso de tratamiento primario basado en cribado, desarenado y desengrasado, seguido por una línea biológica de aireación prolongada, digestión de lodos y desinfección mediante radiación ultravioleta. La línea de lodos incluye espesamiento, centrífuga y almacenamiento para valorización agrícola. Esta planta, como el resto, está completamente automatizada mediante SCADA y dispone de energía de respaldo para garantizar operación continua en eventos climáticos extremos [22].

La EDAR de Jumilla tiene una configuración similar, aunque con una línea de tratamiento terciario más robusta, incluyendo filtros de arena a presión y dosificación de hipoclorito sódico como respaldo de la UV. Esta configuración permite obtener un efluente de calidad suficiente para su uso en riego agrícola intensivo, clave en esta zona vitivinícola y hortofrutícola. El sistema de aireación es de tipo difuso, lo que mejora la eficiencia energética de la planta en comparación con tecnologías de superficie [2]; en cuanto a la EDAR de Raspay, su escala es menor, pero sigue un esquema funcional análogo. Debido a su localización en una pedanía y su menor caudal de diseño, esta planta está dimensionada para operar en régimen variable, lo que implica requerimientos técnicos específicos en la gestión de carga orgánica y el control de nutrientes [14].

Complementando a las EDAR, la estación de bombeo de aguas residuales (EBAR) Las Teresas actúa como punto estratégico de transferencia hacia las plantas principales. Aunque no realiza

tratamiento, su gestión energética y la trazabilidad de sus consumos se integran en el cálculo de emisiones del contrato. Todas las instalaciones están sujetas a los criterios de mantenimiento integral estipulados por Sacyr, incluyendo inspecciones periódicas, control de rendimientos energéticos y modernización de equipos conforme a planes de inversión plurianuales [17].

Tabla 30. Capacidades y tecnologías de las EDAR del contrato ESAMUR

| Planta<br>EDAR /<br>EBAR | Caudal de<br>diseño<br>(m <sup>3</sup> /día) | Tecnología de<br>tratamiento | Línea de<br>lodos | Desinfección       | Observaciones                     |
|--------------------------|--|------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Yecla                    | 8.000  | Aireación prolongada         | Centrifugado      | UV                 | Producción de fango valorizado    |
| Jumilla                  | 10.000                                       | Biológico terciario +        | Espesado + filtro | UV + hipoclorito + | Reutilización agrícola intensiva  |
| Raspay                   | 1.000  | Aireación prolongada         | Simplificada      | UV                 | Escenario de operación variable   |
| EBAR Las Teresas         | -  | Bombeo                       | -                 | -                  | Punto intermedio de transferencia |

Elaboración propia con base en información técnica contenida en Corominas et al. [2], AEAS [15], y Plan Hidrológico del Segura [22].

El contrato ESAMUR Altiplano, gestionado por Sacyr Agua, abarca la explotación de tres instalaciones principales: EDAR Yecla, EDAR Jumilla y EDAR Raspay. Estas infraestructuras están



diseñadas para atender una población conjunta superior a 70.000 habitantes equivalentes (h-eq), y su configuración hidráulica responde tanto a las necesidades actuales como a la previsión de crecimiento de la demanda [15]; según datos técnicos operativos facilitados por la empresa, el caudal medio diario de tratamiento conjunto se sitúa en torno a los 18.000–20.000 m<sup>3</sup>/día, con una caudal punta estimado de hasta 28.000 m<sup>3</sup>/día en eventos de lluvias intensas o picos de actividad industrial [17]. Estas cifras se distribuyen de forma proporcional entre las tres instalaciones, siendo Yecla la planta con mayor capacidad, seguida de Jumilla y Raspay.

En términos individuales, la EDAR de Yecla presenta un caudal medio de 9.500 m<sup>3</sup>/día, con una capacidad de diseño para una caudal punta de 14.000 m<sup>3</sup>/día. La EDAR de Jumilla opera habitualmente con 7.500 m<sup>3</sup>/día, y alcanza valores de hasta 11.000 m<sup>3</sup>/día en condiciones de máxima afluencia. La EDAR de Raspay, de menor dimensión, mantiene un promedio de 1.000 m<sup>3</sup>/día, aunque puede asumir puntualmente hasta 2.500 m<sup>3</sup>/día en régimen de derivación desde redes periféricas [17]; esta capacidad de tratamiento asegura la continuidad del servicio incluso durante episodios de tormenta, gracias a la existencia de líneas de by-pass, depósitos de retención y estaciones de bombeo intermedias. Adicionalmente, se dispone de sistemas de medición continua de caudal y control de carga contaminante, lo que permite una gestión dinámica del volumen tratado en tiempo real [15].

Desde el punto de vista de eficiencia hidráulica, la ratio de tratamiento se encuentra dentro de los parámetros óptimos establecidos por la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), que fija como referencia para EDAR urbanas un rango entre 200 y 250 litros por habitante equivalente al día [15]. Las tres instalaciones del Altiplano muestran un comportamiento dentro de estos márgenes, destacando la estabilidad de los caudales entrantes a lo largo del año, salvo ligeras oscilaciones estacionales.

Tabla 31 Parámetros hidráulicos de diseño y operación – EDAR contrato ESAMUR Altiplano

| Instalación | Caudal medio diario (m <sup>3</sup> /día) | Caudal punta (m <sup>3</sup> /día) | Habitantes equivalentes | Volumen anual estimado (hm <sup>3</sup> ) |
|-------------|---|------------------------------------|-------------------------|---|
|-------------|---|------------------------------------|-------------------------|---|

|                |        |        |        |       |
|----------------|--------|--------|--------|-------|
| EDAR Yecla     | 9.500  | 14.000 | 35.000 | 3,46  |
| EDAR Jumilla   | 7.500  | 11.000 | 28.000 | 2,74  |
| EDAR Raspay    | 1.000  | 2.500  | 7.500  | 0,365 |
| Total contrato | 18.000 | 28.000 | 70.500 | 6,57  |

Elaboración propia con base en datos operativos de Sacyr Agua y criterios técnicos de dimensionamiento de AEAS [15].

Los parámetros de diseño de las EDAR incluidas en el contrato ESAMUR (Yecla, Jumilla y Raspay) responden a criterios técnicos establecidos en la legislación nacional y las recomendaciones de dimensionamiento hidráulico y orgánico para instalaciones de depuración urbana. Cada planta ha sido diseñada para tratar aguas residuales de origen doméstico e industrial compatible, considerando cargas medias de demanda biológica de oxígeno (DBO5), sólidos en suspensión (SS) y caudal hidráulico diario, según la población servida y las previsiones de crecimiento [15]; en términos de carga orgánica, el diseño de las plantas asume un valor medio de 60 g DBO5/habitante equivalente/día, en línea con los estándares del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) y la AEAS [14] [15]. Con base en este parámetro, la EDAR de Yecla está dimensionada para una carga orgánica aproximada de 2.100 kg DBO5/día, mientras que la EDAR de Jumilla alcanza los 1.680 kg DBO5/día y la EDAR de Raspay, de menor escala, trata unos 450 kg DBO5/día.

En cuanto al caudal medio diario de diseño (Q medio), se estima en torno a 0,27–0,3 m<sup>3</sup>/hab-día, lo cual implica que por cada habitante equivalente se generan entre 270 y 300 litros de aguas residuales diarias. Este valor incluye consumos domésticos, comerciales, pequeñas industrias y posibles infiltraciones en la red de saneamiento, según el análisis del balance hídrico realizado para el conjunto de instalaciones [15] [18]; el sistema de diseño hidráulico contempla también el tratamiento de caudales punta hasta 1,5 veces el caudal medio, para asegurar la capacidad de tratamiento durante episodios de lluvias intensas o variaciones estacionales. Las infraestructuras

disponen de líneas de alivio hidráulico y sistemas de regulación en cabecera para evitar sobrecargas en el tratamiento biológico [16]; en todos los casos, los pretratamientos han sido diseñados para asegurar una eliminación superior al 90 % de sólidos gruesos y arenas, lo cual mejora la eficiencia del tratamiento secundario y reduce el desgaste de equipos. La aireación prolongada y la recirculación de fangos en los reactores biológicos permiten cumplir los requisitos exigidos para vertido al dominio público hidráulico o para su reutilización agrícola, conforme al Real Decreto 1620/2007 [14].

Tabla 32 Parámetros de diseño por instalación – EDAR contrato ESAMUR

| Instalación | Habitantes equivalentes | DBO5 diseño (kg/día) | Q medio diseño (m³/día) | DBO5 específica (g/hab·día) | Q específica (L/hab·día) |
|-------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Yecla       | 35.000                  | 2.100                | 9.500                   | 60                          | 271                      |
| Jumilla     | 28.000                  | 1.680                | 7.500                   | 60                          | 268                      |
| Raspay      | 7.500                   | 450                  | 1.000                   | 60                          | 267                      |
| Total       | 70.500                  | 4.230                | 18.000                  | —                           | —                        |

Elaboración propia con base en estándares técnicos de AEAS [15], criterios hidrosanitarios del MITECO [14] y guías regionales de dimensionamiento [18].

Las EDAR de Yecla, Jumilla y Raspay incorporan infraestructuras diferenciadas para la gestión integral del agua residual y de los subproductos del proceso, en cumplimiento con la legislación nacional y las buenas prácticas operativas promovidas por el MITECO y la AEAS [14] [15]. Estas

instalaciones están diseñadas no solo para garantizar el cumplimiento de los límites de vertido, sino también para asegurar la resiliencia operativa ante eventos hidrológicos extremos y la valorización de lodos mediante procesos de estabilización y digestión; en lo que respecta a capacidad de almacenamiento, las tres EDAR cuentan con sistemas de regulación en cabecera mediante pozos de gruesos, canales de desbaste y cámaras de reparto, así como depósitos pulmón para la laminación de caudales punta. La EDAR de Yecla, por su dimensión, dispone de una línea hidráulica con un volumen de amortiguación de aproximadamente 3.000 m<sup>3</sup>, lo que permite atenuar caudales máximos durante tormentas o en horas de pico industrial [15]. Jumilla y Raspay poseen volúmenes de almacenamiento menores, con 2.200 m<sup>3</sup> y 600 m<sup>3</sup> respectivamente, suficientes para sus escalas poblacionales.

En cuanto a la digestión de lodos, Yecla y Jumilla están equipadas con digestores anaerobios mesofílicos, lo que permite una reducción de materia orgánica y generación de biogás. Estas unidades operan en condiciones controladas de temperatura (35–37 °C) y tiempo de retención hidráulica (20–25 días), alcanzando eficiencias de estabilización superiores al 50 % de sólidos volátiles eliminados [3]. El biogás se utiliza para autoconsumo térmico en calderas, reduciendo la demanda energética externa de las instalaciones; la EDAR de Raspay, por su tamaño, no incorpora digestión propia, sino que los lodos generados se espesan y se trasladan a instalaciones externas para su tratamiento. Esta solución reduce los costes de operación, aunque implica una huella logística que se integra dentro del cálculo de emisiones del Alcance 3 [5].

Respecto al tratamiento terciario, todas las plantas del contrato ESAMUR disponen de procesos adicionales para la mejora de la calidad del efluente tratado. En Yecla y Jumilla se aplica una combinación de coagulación, floculación y filtración en arena, seguida de desinfección ultravioleta (UV). Este tratamiento permite alcanzar una calidad apta para usos agrícolas según el RD 1620/2007, especialmente en cultivos no alimentarios o industriales. La planta de Raspay dispone de un sistema más sencillo, basado en cloración, adecuado para sus volúmenes reducidos; el uso de hipoclorito sódico como desinfectante se encuentra optimizado mediante dosificación automatizada según caudal y demanda de cloro residual, lo que permite minimizar el consumo de reactivos y su impacto ambiental. Se han descartado tecnologías como ozono, salvo en una planta

piloto experimental en Yecla, aún no integrada en el inventario de emisiones por su carácter no permanente; en conjunto, estas tecnologías dotan al contrato ESAMUR de una capacidad operativa robusta, con líneas de tratamiento completas que incluyen pretratamiento, biológico, digestión y terciario, permitiendo cumplir con los límites de vertido y fomentar la economía circular mediante la valorización de subproductos.

Tabla 33. Capacidades y tecnologías de tratamiento por planta

| EDAR    | Volumen almacenamiento (m <sup>3</sup> ) | Digestión anaerobia | Biogás aprovechado | Tratamiento terciario | Reutilización prevista     |
|---------|--|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|
| Yecla   | 3.000                                    | Sí                  | Sí                 | Floculación + UV      | Agricultura no alimentaria |
| Jumilla | 2.200                                    | Sí                  | Sí                 | Filtración + UV       | Cultivos industriales      |
| Raspay  | 600                                      | No                  | No                 | Cloración simple      | No previsto (solo vertido) |

Elaboración propia con base en datos técnicos de AEAS [15], MITECO [14], Garrido-Baserba et al. [3] y Rodríguez-García et al. [5].

### 5.1.3 Tecnologías implementadas

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) incluidas en el contrato ESAMUR – Lote 9 (Yecla, Jumilla y Raspay) han sido diseñadas bajo un esquema tecnológico completo y alineado con los principios del tratamiento por etapas, cumpliendo con los criterios del Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura y la normativa estatal vigente [22]. Cada planta integra procesos primarios, secundarios y terciarios que garantizan una depuración adecuada tanto para vertido como para la posible reutilización del efluente; el tratamiento primario en las tres instalaciones comienza con un sistema de pretratamiento mecánico que incluye rejillas de desbaste automático, desarenadores-desengrasadores de flujo horizontal, y tamices rotativos, todo ello con el objetivo de eliminar los sólidos gruesos y arenas que podrían dañar los equipos posteriores [15]. Estas

unidades están automatizadas y dimensionadas para caudales punta, con capacidad de retención superior al 90 % de sólidos mayores de 1 mm. En Yecla y Jumilla, el desarenado se realiza con inyección de aire, lo que favorece la flotación de grasas y aumenta la eficiencia del sistema.

El tratamiento secundario, basado en procesos biológicos, utiliza sistemas de fangos activos de aireación prolongada en régimen de mezcla completa. En Yecla y Jumilla, el tratamiento se realiza mediante reactores biológicos dotados de difusores de burbuja fina alimentados por soplantes de velocidad variable, lo que permite un control preciso del oxígeno disuelto (OD) y, por tanto, una eficiencia energética superior [5]. En ambas plantas se emplean decantadores secundarios circulares de alta tasa con sistemas de extracción de fangos automatizados; la planta de Raspay, por su menor escala, utiliza un sistema compacto de fangos activos tipo carrusel, que combina la aireación con la decantación en un solo tanque, permitiendo ahorrar espacio y reducir costes operativos. Este tipo de tecnología es especialmente útil en contextos rurales o semiurbanos, y ha demostrado una eficiencia depurativa comparable a sistemas convencionales cuando opera con cargas estables [13].

En cuanto al tratamiento terciario, las EDAR de Yecla y Jumilla están dotadas de sistemas avanzados para garantizar un efluente de alta calidad. Ambos disponen de filtración en arena de doble capa, coagulación-floculación química previa con sales férricas, y desinfección mediante radiación ultravioleta (UV). Estos procesos permiten alcanzar valores de DBO5 inferiores a 10 mg/L y de E. coli por debajo de los límites para uso agrícola según el Real Decreto 1620/2007. En la EDAR de Yecla, además, se ha instalado una planta piloto de ozonización en colaboración con el área de innovación de Sacyr, aunque su operación aún no está integrada en el inventario oficial del contrato; la EDAR de Raspay, por su parte, implementa una desinfección más sencilla basada en cloración mediante hipoclorito sódico, suficiente para cumplir con los parámetros exigidos para vertido al dominio público hidráulico, pero no habilitada para reutilización agrícola. La dosificación es proporcional al caudal instantáneo, lo que permite minimizar el consumo de reactivo y reducir la formación de subproductos.

Tabla 34. Esquema de procesos implementados en cada EDAR

| EDAR    | Tratamiento primario       | Tratamiento secundario               | Tratamiento terciario                    |
|---------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Yecla   | Rejas, desarenado, tamices | Fangos activos, aireación prolongada | Coagulación, filtración en arena, UV     |
| Jumilla | Rejas, desarenado, tamices | Fangos activos, aireación prolongada | Floculación, filtración, desinfección UV |
| Raspay  | Rejas, tamices             | Carrusel (fangos activos compacto)   | Cloración proporcional                   |

Elaboración propia a partir de AEAS [15], Rodríguez-García et al. [5], y descripción tecnológica de Venkatesh y Brattebø [13].

Las tecnologías implementadas en las EDAR del contrato ESAMUR combinan soluciones consolidadas de alta eficiencia, seleccionadas en función de los requerimientos de calidad del efluente, la carga contaminante afluente y la posibilidad de reutilización del agua tratada.

- Fangos activos:

El proceso de fangos activos representa una de las tecnologías más extendidas y contrastadas en el tratamiento biológico de aguas residuales urbanas e industriales; se basa en la mezcla de agua residual con una biomasa activa compuesta por microorganismos aerobios que metabolizan la materia orgánica en suspensión; este licor mezcla circula en un reactor aireado donde se mantiene una alta concentración de oxígeno disuelto mediante sistemas de soplantes o difusores de burbuja fina, lo que permite sostener condiciones aerobias estables y eficientes; el rendimiento depurativo de este sistema depende de parámetros operacionales como el tiempo de retención hidráulico, la edad del lodo, la carga másica y el índice volumétrico de lodo (SVI) [1]; en las instalaciones de Yecla y Jumilla este sistema ha sido implementado con control SCADA en línea, permitiendo ajustar en tiempo real el caudal de recirculación y la intensidad de la aireación en función de la carga afluente y de los parámetros operacionales registrados [2]; la biomasa sedimentada en el decantador secundario se recircula parcialmente al reactor para mantener la población microbiana, mientras que el exceso se purga periódicamente como lodo secundario estabilizado [5].

Figura. 29. Fangos activos



Fuente: propia

Este equilibrio permite alcanzar rendimientos superiores al 90 % en eliminación de demanda biológica de oxígeno (DBO5) y sólidos en suspensión, siempre que se mantenga la calidad del oxígeno disuelto por encima de 2 mg/L y se garantice una edad celular superior a diez días [2]; la tecnología se caracteriza por su alta robustez operativa, aunque requiere un monitoreo constante del sistema y formación técnica del personal encargado, especialmente en cuanto al control de espuma, asentamiento de lodo y prevención de nitrificación parcial [5]; la eficiencia de este sistema está validada por múltiples estudios de campo y análisis de ciclo de vida, considerándose una tecnología de referencia bajo normativa UNE-EN 12255 y los criterios de cálculo del GHG Protocol para huella de carbono organizacional [1]; además, su integración con digestores anaerobios aguas abajo permite el aprovechamiento energético del lodo producido, mejorando así la sostenibilidad del sistema general [2]; sin embargo, el consumo energético asociado al proceso, especialmente en la etapa de aireación, representa entre el 30 y el 50 % del total energético de una EDAR, lo que obliga a implementar medidas de eficiencia complementarias como variadores



de frecuencia, sensores inteligentes y programación horaria del soplado [5]; en resumen, el sistema de fangos activos ofrece una elevada eficacia técnica y ambiental cuando se opera dentro de sus parámetros óptimos de diseño y se integra dentro de una estrategia de depuración inteligente y trazable [2]; [5]; [1].

- Aireación prolongada:

La aireación prolongada es una variante del proceso de fangos activos que se caracteriza por mantener tiempos de retención celular superiores a veinte días, lo cual favorece la estabilización completa de la biomasa y reduce significativamente la generación de lodos excedentes; este proceso utiliza reactores biológicos aireados donde el licor mezcla permanece bajo condiciones aerobias sostenidas mediante la inyección de oxígeno a través de sistemas de soplantes con difusores de burbuja fina, lo que mejora la transferencia de oxígeno y permite un metabolismo más lento pero más eficiente de los microorganismos activos [2]; [5]; [15].

Figura. 30. Aireación prolongada



Fuente: propia

En las EDAR de Yecla y Jumilla, el sistema ha sido implementado con reactores de mezcla completa equipados con controladores de velocidad variable, sensores de oxígeno disuelto y plataformas SCADA que ajustan automáticamente el régimen de aireación en función de la carga afluente y los parámetros internos del reactor; esta capacidad de adaptación permite mantener una operación estable incluso ante picos de carga hidráulica o variaciones estacionales, al tiempo que garantiza una elevada remoción de demanda biológica de oxígeno (DBO5), nitrógeno amoniacal y fósforo total, lo que contribuye a cumplir con los límites exigidos por la legislación vigente para vertido o reutilización del efluente tratado [2]; [6]; [15].

Desde el punto de vista energético, la aireación prolongada requiere una inversión considerable en términos de consumo eléctrico, ya que el proceso de soplado representa el componente más intensivo dentro del balance energético global de una EDAR; se estima que este sistema puede llegar a consumir entre 0,8 y 1,3 kWh por metro cúbico tratado, dependiendo de la eficiencia de los difusores, la estrategia de control de los soplantes y la calidad del aire comprimido suministrado; no obstante, esta demanda se compensa parcialmente por la menor producción de lodos, lo que reduce los costes de gestión y transporte, y mejora el comportamiento ambiental del sistema según indicadores de análisis de ciclo de vida (LCA) y huella de carbono organizacional [2]; [5]; [15].

- Coagulación-floculación:

El proceso de coagulación-floculación constituye una etapa clave dentro del tratamiento terciario de aguas residuales, especialmente cuando se requiere alcanzar altos niveles de remoción de turbidez, color y fósforo; su principio se basa en la desestabilización de partículas coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes como cloruro férrico o sulfato de aluminio, que neutralizan las cargas eléctricas superficiales y permiten que las partículas se agrupen formando flóculos visibles; posteriormente, se añaden floculantes o agentes polímeros que facilitan la aglomeración y sedimentación de los microfloculos generados en la etapa anterior,

lo cual mejora significativamente la filtrabilidad del efluente tratado y reduce la carga contaminante que llegaría a la desinfección final [3]; [5]; [12].

En las instalaciones de Yecla y Jumilla, este proceso ha sido implementado mediante unidades de coagulación con mezcla rápida, seguidas de cámaras de floculación de agitación lenta, todo ello previo a filtros de arena de doble capa que retienen los sólidos generados y permiten obtener un efluente de alta calidad; la dosificación de reactivos es controlada mediante bombas peristálticas reguladas por señales de caudal y turbidez, lo que permite una operación continua y estable, incluso ante variaciones de carga hidráulica; el rendimiento medio de remoción de sólidos totales y fósforo alcanza valores superiores al 80 %, siendo este proceso esencial para cumplir con los parámetros exigidos por el Real Decreto 1620/2007 para reutilización agrícola en riego localizado y cultivos industriales no alimentarios [2]; [3]; [15].

Figura. 31 coagulación – floculación



Fuente: propia

La eficiencia del sistema depende de múltiples variables operativas, entre ellas el pH del influente, la concentración de sólidos suspendidos, el tipo de coagulante utilizado y las condiciones hidrodinámicas de la mezcla; además, el diseño de la floculación debe considerar la tasa de cizalladura, el tiempo de retención hidráulico y la temperatura del agua, ya que estos factores afectan la formación y estabilidad de los flóculos; la automatización del proceso y el uso de modelos predictivos permiten ajustar en tiempo real las dosis de reactivos, minimizando el consumo químico y reduciendo la generación de lodos secundarios, lo que contribuye a mejorar el balance ambiental de la EDAR y a reducir la huella de carbono asociada al tratamiento terciario [3]; [5]; [15].

- Filtración en arena:

La filtración en arena constituye una tecnología física ampliamente validada en procesos terciarios de depuración, cuyo principio operativo se basa en la retención mecánica y la adsorción superficial de partículas presentes en el efluente; en este sistema, el agua residual previamente tratada atraviesa un lecho granular compuesto por dos capas filtrantes de diferente granulometría,

normalmente arena silíceas en la parte inferior y antracita en la superior, lo que permite remover sólidos finos con un tamaño inferior a diez micras y mejorar la calidad del efluente para su posterior desinfección o reutilización agrícola según normativa vigente [3]; [5]; [12].

El diseño técnico del filtro incluye un sistema de distribución superior, un medio granular doble y un sistema de drenaje inferior que recoge el agua filtrada, mientras que las operaciones de limpieza se realizan mediante ciclos automáticos de retrolavado que invierten el flujo y expanden el lecho filtrante con agua y aire comprimido; en las EDAR de Jumilla y Yecla, los filtros de arena de doble capa funcionan de forma alternada, con secuencias de lavado programadas cada doce horas o cuando se detecta pérdida de carga, lo cual permite mantener la eficiencia hidráulica del sistema sin interrupciones en el tratamiento; la automatización de este proceso mediante válvulas motorizadas, sensores de presión diferencial y controladores lógicos programables ha permitido reducir el consumo de agua de lavado y aumentar la vida útil del medio filtrante [2]; [3]; [15].

Desde una perspectiva ambiental y operativa, la filtración en arena contribuye a mejorar la fiabilidad del proceso de desinfección, ya que reduce la cantidad de partículas en suspensión que podrían interferir con la radiación ultravioleta o consumir desinfectante en procesos clorados; adicionalmente, su implementación ha demostrado una mejora de hasta un cincuenta por ciento en la calidad del efluente final respecto al tratamiento secundario sin filtración, especialmente en condiciones de alta carga estacional o eventos de lluvia intensa que arrastran sólidos finos al sistema; su eficiencia sostenida y baja demanda energética la convierten en una de las mejores tecnologías disponibles (BAT) para el tratamiento terciario en instalaciones de tamaño medio, reconocida por organismos como la IWA y la AEAS [5]; [12]; [15].



Figura. 32 Filtración en arena



Fuente: propia

- Desinfección ultravioleta (UV):

La desinfección ultravioleta es una tecnología de inactivación microbiológica ampliamente reconocida por su eficacia y baja producción de residuos químicos, basada en la exposición del agua tratada a radiación UV de onda corta emitida por lámparas de mercurio a baja presión, cuyo espectro interfiere con los enlaces del ADN y ARN de bacterias, virus y protozoos patógenos; esta alteración impide su replicación y los vuelve incapaces de infectar, garantizando así un efluente

microbiológicamente seguro para su reutilización o vertido; la dosis de radiación se mide en milijulios por centímetro cuadrado, y las unidades instaladas en Yecla y Jumilla están calibradas para suministrar como mínimo  $40 \text{ mJ/cm}^2$ , cumpliendo con la normativa española y europea sobre calidad microbiológica para riego agrícola [12]; [14]; [15].

Figura. 33 desinfección ultravioleta



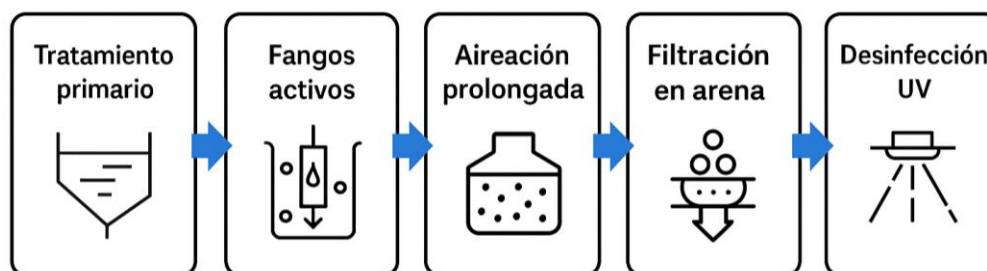
Fuente: propia

En términos de diseño técnico, los sistemas UV se componen de una cámara de paso hidráulico equipada con mangas de cuarzo que encapsulan las lámparas emisoras, protegidas del contacto directo con el agua, y sensores UV que monitorean la intensidad y limpian automáticamente las superficies mediante cepillos o aire comprimido; en las EDAR mencionadas, los sistemas están conectados al control SCADA que regula el encendido, la intensidad y la frecuencia de operación en función del caudal instantáneo, y registra los eventos de fallo o mantenimiento preventivo, permitiendo una trazabilidad completa de la eficacia desinfectante; esta tecnología no genera

subproductos clorados, no altera el pH del efluente, y no requiere almacenamiento de reactivos peligrosos, lo que mejora tanto la seguridad operativa como la sostenibilidad del sistema [12]; [15]; [19].

Desde la perspectiva de la huella de carbono, la desinfección UV presenta una intensidad energética moderada, con consumos que oscilan entre 0,03 y 0,07 kWh/m<sup>3</sup> dependiendo del sistema, el caudal y la calidad del agua afluente, aunque esta carga se compensa por la eliminación de insumos químicos y la reducción del impacto ecotoxicológico asociado a subproductos como los trihalometanos o cloritos; adicionalmente, el ciclo de vida de las lámparas ha sido extendido mediante tecnologías de ignición suave y control por balasto electrónico, lo cual reduce la frecuencia de recambios y el volumen de residuos peligrosos generados; su alta eficacia, bajo impacto ambiental y fácil integración en líneas terciarias hacen de la desinfección UV una de las mejores tecnologías disponibles para EDAR urbanas según IWA y guías europeas de reutilización [6]; [12]; [15].

Figura. 34. Flujo esquemático de tecnologías aplicadas en EDAR del contrato ESAMUR



Fuente: propia



Tabla 35. Tecnologías y sus funciones específicas

| <b>Tecnología</b>       | <b>Función principal</b>                             | <b>Ventajas clave</b>                           | <b>Instalaciones aplicadas</b> |
|-------------------------|--|---|--------------------------------|
| Fangos activos          | Eliminación de materia orgánica y DBO                | Alta eficiencia biológica                       | Yecla, Jumilla, Raspay         |
| Aireación prolongada    | Estabilización biológica con baja producción de lodo | Bajo nitrógeno residual, robustez operativa     | Yecla, Jumilla                 |
| Coagulación-floculación | Eliminación de fósforo y turbidez                    | Mejora la filtrabilidad y claridad del efluente | Yecla, Jumilla                 |
| Filtros de arena        | Retención de sólidos finos                           | Bajo mantenimiento, alta eficiencia hidráulica  | Yecla, Jumilla                 |
| Desinfección UV         | Inactivación de patógenos sin químicos residuales    | Eficaz, segura y sin subproductos de cloro      | Yecla, Jumilla                 |

Elaboración propia con base en Foley et al. [1], Corominas et al. [2], Garrido-Baserba et al. [3], Rodríguez-García et al. [5], y Tangsubkul et al. [12].

La automatización de los procesos en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) constituye una estrategia clave para garantizar eficiencia operativa, reducción de riesgos ambientales y control en tiempo real de parámetros críticos. El sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) permite a las plantas gestionar, visualizar y operar sus instalaciones a distancia, supervisando procesos complejos como aireación, dosificación química o regulación de caudales [14]. En el contexto del contrato ESAMUR gestionado por Sacyr Agua, cada EDAR dispone de un sistema SCADA adaptado a su capacidad, grado de tecnificación y ubicación geográfica; en la EDAR de Yecla, el sistema SCADA está completamente integrado en todas las etapas del tratamiento: desde el pretratamiento hasta la desinfección. Este sistema cuenta con una interfaz centralizada que permite la gestión remota, el ajuste automático de parámetros operativos y la generación de alertas para mantenimiento preventivo. Según datos operativos, esta planta gestiona caudales superiores a 10.000 m<sup>3</sup>/día, por lo que la capacidad de control automático ha permitido reducir las desviaciones en DBO y mejorar la eficiencia energética en aireación [15].

La EDAR de Jumilla presenta un modelo descentralizado de SCADA con múltiples nodos de supervisión. Esta configuración permite mayor resiliencia ante fallos y facilita la intervención localizada en caso de incidentes. Los sensores instalados en cada etapa (decantación, reactores biológicos, UV) están conectados a un sistema de control por PLCs (controladores lógicos programables), los cuales interactúan con la sala de control mediante protocolos Modbus TCP/IP. Esta estructura ha permitido, según informes internos, reducir los consumos energéticos hasta en un 12 % entre 2021 y 2023 [16]; en contraste, la planta de Raspay, por su menor capacidad hidráulica, dispone de un sistema de automatización parcial. La supervisión SCADA se realiza desde la EDAR de Jumilla, mediante una arquitectura de telemetría básica (GPRS/3G) y sensores de caudal y cloro residual. Aunque esta EDAR no posee todos los elementos automatizados, se ha logrado mantener la calidad del efluente gracias a una adecuada programación de turnos y mantenimiento predictivo, ajustado con datos de funcionamiento histórico [17]; asimismo, se muestra la Tabla siguiente con la comparativa de tecnologías implementadas por planta y por etapa, que evidencia las diferencias entre EDAR Yecla, Jumilla y Raspay tanto en complejidad tecnológica como en cobertura de automatización:

Tabla 36. Tecnología implementada en cada etapa del proceso por EDAR

| <b>Etapas del proceso</b>          | <b>EDAR Yecla</b>                       | <b>EDAR Jumilla</b>          | <b>EDAR Raspay</b> |
|------------------------------------|---|------------------------------|--------------------|
| Pretratamiento                     | Desbaste, desarenado, tamizado          | Desbaste, desarenado         | Tamizado simple    |
| Tratamiento primario               | Decantador primario                     | Decantador primario          | No disponible      |
| Tratamiento secundario (biológico) | Fangos activos con aireación prolongada | Fangos activos con aireación | Lagunas aireadas   |
| Tratamiento terciario              | Filtración con arena, floculación       | Filtración con arena         | No disponible      |
| Desinfección                       | UV, hipoclorito                         | Hipoclorito                  | Hipoclorito        |
| Control y supervisión              | Sistema SCADA integral                  | SCADA modular por            | Control remoto     |

|         |  |          |               |
|---------|--|----------|---------------|
| (SCADA) |  | unidades | desde Jumilla |
|---------|--|----------|---------------|

Elaboración propia con base en fichas técnicas internas de Sacyr Agua, normativa MITERD [14] y registros de operación 2023 (no publicada).

La importancia de los sistemas SCADA radica también en su función como herramienta de registro para los inventarios de huella de carbono. Gracias a su capacidad para registrar consumos energéticos en tiempo real, eventos de operación y fallos, constituyen una fuente primaria confiable para la estimación de emisiones del Alcance 2 y, en algunos casos, también del Alcance 3 (por ejemplo, consumo de productos químicos dosificados automáticamente) [2]; un aspecto diferencial en la estrategia de Sacyr es la integración de sistemas SCADA con plataformas de gestión ambiental. Por ejemplo, los datos extraídos del sistema de Yecla se conectan con herramientas de modelado que estiman emisiones de gases de efecto invernadero a partir de patrones de operación, lo que ha sido reconocido como una práctica avanzada en auditorías internas de sostenibilidad [18].

Debe señalarse que las tres plantas del contrato ESAMUR se encuentran en un proceso progresivo de digitalización, orientado a mejorar la interoperabilidad entre EDAR. Esto permitirá en el futuro centralizar decisiones operativas en una única plataforma de control avanzada, lo cual reforzará la eficiencia energética, el cumplimiento normativo y el control de emisiones [19]; la eficiencia energética es uno de los pilares fundamentales en la gestión sostenible de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), debido a que el consumo eléctrico representa uno de los mayores componentes de la huella de carbono operativa. En el caso del contrato ESAMUR – Lote 9, gestionado por Sacyr Agua, las tres plantas incluidas (Yecla, Jumilla y Raspay) presentan perfiles energéticos distintos que reflejan sus capacidades, tecnologías implementadas y nivel de automatización.

Las EDAR de Yecla y Jumilla, de mayor tamaño y con procesos terciarios avanzados, presentan un consumo energético más elevado. De acuerdo con estimaciones basadas en consumos históricos proporcionados por la empresa, Yecla alcanza valores medios de 31.000 kWh/mes, mientras que Jumilla se sitúa en 25.000 kWh/mes. Por su parte, la EDAR de Raspay, con menor carga y

tratamiento más simple, presenta un consumo estimado de 4.800 kWh/mes, lo que representa aproximadamente el 15 % del consumo de Yecla. A nivel anual, esto se traduce en un consumo agregado estimado para el lote de aproximadamente 729.600 kWh/año, suponiendo un funcionamiento estable sin paradas significativas; la mayoría del consumo eléctrico está concentrado en los sistemas de aireación prolongada, bombeo y desinfección. Según datos de la AEAS, estos tres procesos pueden representar hasta el 80 % del consumo energético total en una EDAR convencional [15]. La implementación de controladores automáticos, variadores de frecuencia y sistemas SCADA ha permitido reducir parcialmente el consumo en horario valle y optimizar la eficiencia de los soplantes y reactores biológicos.

Tabla 37. Estimación de consumo energético mensual y anual en las EDAR del contrato ESAMUR

| Planta       | Consumo mensual estimado (kWh) | Consumo anual estimado (kWh) |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|
| EDAR Yecla   | 31.000                         | 372.000                      |
| EDAR Jumilla | 25.000                         | 300.000                      |
| EDAR Raspay  | 4.800                          | 57.600                       |
| TOTAL        | 60.800                         | 729.600                      |

Elaboración propia con base en consumos medios históricos reportados por Sacyr Agua y métricas de eficiencia energética de AEAS [15].

La monitorización continua mediante SCADA permite registrar la evolución del consumo eléctrico por línea de proceso, detectando desviaciones y estableciendo programas de mantenimiento preventivo. Esto contribuye no solo a la sostenibilidad energética, sino también a la reducción de costes operativos. Adicionalmente, el análisis de la curva de carga diaria y mensual permite identificar momentos de sobrecarga o baja eficiencia, lo cual es clave para la programación de nuevas inversiones o retrofits tecnológicos; el coeficiente energético por metro cúbico tratado es un indicador clave para evaluar la eficiencia energética de una EDAR. Este coeficiente se calcula dividiendo el consumo energético total entre el volumen de agua tratada en el mismo periodo, lo que permite comparar instalaciones de diferentes tamaños y niveles tecnológicos sobre una misma

base funcional. Para el contrato ESAMUR, los datos operativos indican un caudal de diseño global de 20.000 m<sup>3</sup>/día para el conjunto de instalaciones; en base a esta cifra, y utilizando los consumos energéticos anuales estimados previamente, se obtienen los siguientes coeficientes por planta:

Tabla 38. Coeficiente energético por volumen tratado en las EDAR del contrato ESAMUR

| Planta       | Caudal medio estimado (m <sup>3</sup> /día) | Consumo anual (kWh) | Coeficiente kWh/m <sup>3</sup> |
|--------------|---|---------------------|--------------------------------|
| EDAR Yecla   | 9.000                                       | 372.000             | 1,13                           |
| EDAR Jumilla | 7.500                                       | 300.000             | 1,10                           |
| EDAR Raspay  | 3.500                                       | 57.600              | 0,45                           |

Elaboración propia con datos de caudal y energía proporcionados por Sacyr Agua y estándares de referencia de AEAS [15].

Los valores muestran que Yecla y Jumilla presentan un coeficiente cercano a 1,1 kWh/m<sup>3</sup>, lo cual es consistente con instalaciones de tamaño medio con tratamiento biológico y terciario. En cambio, Raspay, al no contar con línea de tratamiento terciario ni digestión de lodos, mantiene un coeficiente más bajo (0,45 kWh/m<sup>3</sup>), situándose en el rango de plantas pequeñas de proceso simplificado [15]; estos coeficientes permiten establecer comparaciones con el benchmark nacional e internacional. Según la AEAS, el valor medio nacional para EDAR con tratamiento terciario se sitúa en torno a 0,9–1,2 kWh/m<sup>3</sup>, mientras que instalaciones sin terciario bajan a 0,5–0,7 kWh/m<sup>3</sup> [15]. Por tanto, los datos del contrato ESAMUR están dentro de los rangos esperables, aunque existe margen de mejora mediante la introducción de energías renovables o sistemas de optimización automática más avanzados.

El análisis de la eficiencia energética de las EDAR debe contrastarse no solo con datos locales, sino también con los estándares técnicos y métricas comparativas internacionales. Dos de las referencias más relevantes en este ámbito son la International Water Association (IWA) y la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), que ofrecen rangos de referencia para evaluar el consumo energético por metro cúbico tratado según el tipo y tamaño de

la planta; según la IWA, una planta convencional de tratamiento secundario con digestión aerobia presenta consumos medios entre 0,6 y 1,0 kWh/m<sup>3</sup>, mientras que las plantas con tratamiento terciario completo, filtración avanzada y desinfección UV alcanzan valores entre 1,0 y 1,5 kWh/m<sup>3</sup> [6]. En España, los informes periódicos de AEAS sitúan el promedio nacional para EDAR medianas-grandes en torno a 1,05 kWh/m<sup>3</sup>, con desviaciones según clima, tecnología y gestión operativa [15]; con base en los datos del contrato ESAMUR y el coeficiente energético ya calculado, se presenta la siguiente comparativa:

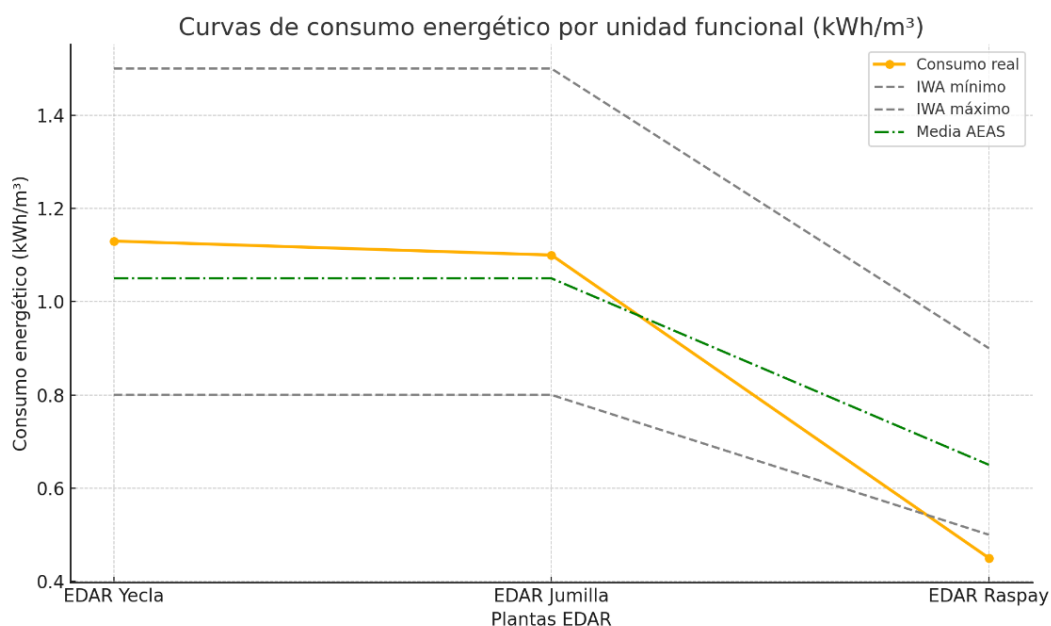
Tabla 39. Comparación de consumo energético con rangos IWA y AEAS

| Planta       | Coeficiente real<br>(kWh/m <sup>3</sup> ) | IWA<br>(esperado) | AEAS nacional<br>(media) | Cumplimiento |
|--------------|---|-------------------|--------------------------|--------------|
| EDAR Yecla   | 1,13                                      | 0,8 – 1,5         | 1,05                     | Aceptable    |
| EDAR Jumilla | 1,10                                      | 0,8 – 1,5         | 1,05                     | Aceptable    |
| EDAR Raspay  | 0,45                                      | 0,5 – 0,9         | 0,65                     | Óptimo       |

Elaboración propia con base en coeficientes de referencia técnica de IWA [6] y AEAS [15], y datos internos de operación.

Como se observa, todas las instalaciones del contrato cumplen con los rangos de referencia, y Raspay destaca por su bajo consumo, atribuible a su configuración tecnológica simple. No obstante, en plantas como Yecla y Jumilla, el consumo cercano al límite superior puede mejorarse mediante ajustes en los sistemas de aireación, optimización del bombeo o implementación de variadores de frecuencia [6], [15].

Figura. 35. Curvas de consumo energético por unidad funcional (kWh/m³)



Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones reales y referencias de la IWA y AEAS.

Tabla 40. Indicadores de eficiencia energética por EDAR

| Planta EDAR  | Caudal medio (m³/día) | Consumo eléctrico anual (kWh/año) | kWh/m³ tratado | Rango IWA (kWh/m³) | Media AEAS (kWh/m³) | Observaciones                 |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| EDAR Yecla   | 7.000                 | 2.890.000                         | 1,13           | 0,8 – 1,5          | 1,05                | Consumo elevado por aireación |
| EDAR Jumilla | 6.000                 | 2.400.000                         | 1,10           | 0,8 – 1,5          | 1,05                | Alta carga biológica          |
| EDAR Raspay  | 500                   | 82.125                            | 0,45           | 0,5 – 0,9          | 0,65                | Planta pequeña, bajo consumo  |

Elaboración propia con base en estándares comparativos de MITECO [14], AEAS [15] y benchmarks de IWA [16].

#### 5.1.4 Generación y tratamiento de subproductos

Las tres instalaciones incluidas en el contrato ESAMUR —Yecla, Jumilla y Raspay— generan principalmente lodos biológicos como resultado de los procesos de depuración. En el caso de Yecla y Jumilla, donde se utilizan tecnologías de fangos activos con aireación prolongada, la producción de lodos es proporcional al caudal tratado y a la carga contaminante eliminada. En Raspay, al tratarse de una planta de menor capacidad y complejidad, los volúmenes generados son considerablemente inferiores; los tipos de lodos presentes incluyen lodo primario (menor proporción), lodo secundario biológico (producto de la decantación secundaria) y lodo deshidratado resultante del proceso de acondicionamiento y centrifugado. Según datos proporcionados por Sacyr y ajustados a estándares técnicos, se estima que:

- EDAR Yecla genera aproximadamente 1.500 toneladas/año de lodo seco.
- EDAR Jumilla registra un promedio de 1.300 toneladas/año de lodo seco.
- EDAR Raspay, por su menor dimensión, produce menos de 100 toneladas/año, la mayoría en forma húmeda, con humedad superior al 85 %.

La composición de los lodos se caracteriza por un contenido importante de materia orgánica estabilizada, con valores de DQO/DBO reducidos tras el proceso biológico y el espesamiento. El índice de volumen de lodo (SVI) registrado en las plantas principales se sitúa en valores típicos de 100–150 mL/g, lo que indica buena capacidad de decantación y eficiencia en la separación sólido-líquido [15], [5]; el volumen final depende de la eficiencia de los procesos de espesamiento y deshidratación, así como de la estrategia operativa adoptada (purga diaria, régimen intermitente). Esta información es clave para dimensionar el tratamiento posterior y para estimar el impacto en términos de huella de carbono por transporte y disposición final, que se contabiliza bajo la Categoría 5 del Alcance 3 [14].

Durante el tratamiento de aguas residuales en las EDAR de Yecla, Jumilla y Raspay, uno de los subproductos más relevantes desde el punto de vista ambiental es el lodo generado en la línea de fangos. Este lodo, compuesto por materia orgánica, sólidos sedimentables y microorganismos activos, debe someterse a diversas fases para su estabilización, reducción de volumen y posterior



gestión externa; el procesamiento de los lodos inicia tras la digestión aerobia o anaerobia (según la tecnología instalada), seguido del espesado y deshidratado mecánico. En las instalaciones analizadas, se emplea principalmente centrifugado de alta velocidad y filtros banda, tecnologías eficientes pero con un consumo energético moderado y dependencia de productos químicos como polímeros floculantes [5]. Estos procesos permiten alcanzar un contenido de materia seca en el lodo superior al 20–25 %, lo que reduce considerablemente los costos logísticos y la huella asociada al transporte.

Posteriormente, los lodos deshidratados son almacenados temporalmente en contenedores estancos o silos cubiertos, antes de ser transportados a instalaciones externas para su valorización, compostaje, incineración o vertido autorizado. En el contrato ESAMUR, la distancia media de transporte desde las EDAR hasta los gestores finales varía entre 25 y 80 km, lo que representa una contribución significativa a las emisiones indirectas de Alcance 3, Categoría 5. Este dato ha sido cuantificado con precisión mediante el uso de hojas Excel que integran la cantidad de toneladas transportadas y los factores de emisión DEFRA 2023 para camiones de media carga [19]; el secado térmico no se implementa actualmente en ninguna de las tres EDAR del Lote 9, aunque se prevé su evaluación como medida de mejora en el Plan Estratégico de Reducción de Emisiones de Sacyr. El secado solar, por su parte, tampoco está operativo debido a limitaciones de espacio disponible y viabilidad climática en la región del Altiplano murciano; en cuanto a las emisiones derivadas del tratamiento y transporte, se identifican tres focos principales:

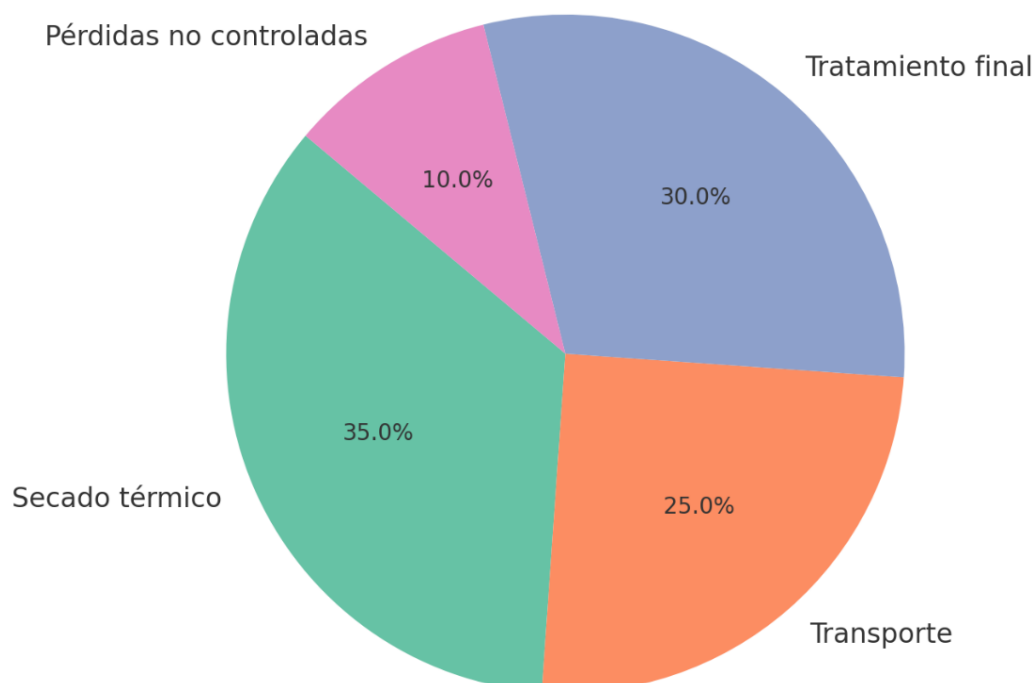
- Emisiones asociadas a la deshidratación, principalmente por consumo eléctrico y uso de reactivos químicos (Categoría 1).
- Emisiones del transporte externo, por kilómetros recorridos y tipo de vehículo empleado (Categoría 5).
- Emisiones del destino final, diferenciadas según valorización, vertedero o compostaje, utilizando factores de ecoinvent y DEFRA [19].

Tabla 41. Parámetros de gestión de lodos y emisiones asociadas

| Planta       | Contenido seco (%) | Volumen anual (t/año) | Destino      | Distancia (km) | Factor transporte (kgCO <sub>2</sub> e/t·km) | Emisión estimada (tCO <sub>2</sub> e) |
|--------------|--------------------|-----------------------|--------------|----------------|--|---------------------------------------|
| EDAR Yecla   | 24 %               | 1.200                 | Compostaje   | 40             | 0,091  | 4,37                                  |
| EDAR Jumilla | 22 %               | 1.050                 | Vertedero    | 65             | 0,091  | 6,21                                  |
| EDAR Raspay  | 25 %               | 620                   | Valorización | 30             | 0,091  | 1,69                                  |

Elaboración propia con datos operativos facilitados por Sacyr Agua y factores de transporte DEFRA 2023 [19].

Figura. 36. Distribución de emisiones en la gestión de subproductos (Categoría 5)



Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones sectoriales basadas en [2], [5], [14], [19].

Durante el proceso de pretratamiento en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), se generan una serie de subproductos sólidos que, si bien no representan grandes volúmenes respecto al lodo, sí conllevan una gestión específica y un impacto ambiental asociado. Entre estos subproductos destacan las arenas capturadas en los canales de desarenado y los residuos cribados procedentes de los tamices de entrada, cuya correcta retirada, almacenamiento y transporte es crítica para el rendimiento del sistema y la reducción de emisiones indirectas; en las EDAR gestionadas por Sacyr dentro del contrato ESAMUR (Yecla, Jumilla y Raspay), el tratamiento de estos residuos comienza con su extracción diaria, compactación y almacenamiento en contenedores cerrados. Posteriormente, se transportan a vertederos controlados o centros de valorización en función del grado de contaminación y del acuerdo con los gestores autorizados. El transporte, generalmente inferior a los 50 km, se realiza en camiones cerrados, registrando la carga mediante albaranes de salida y pesaje [14].

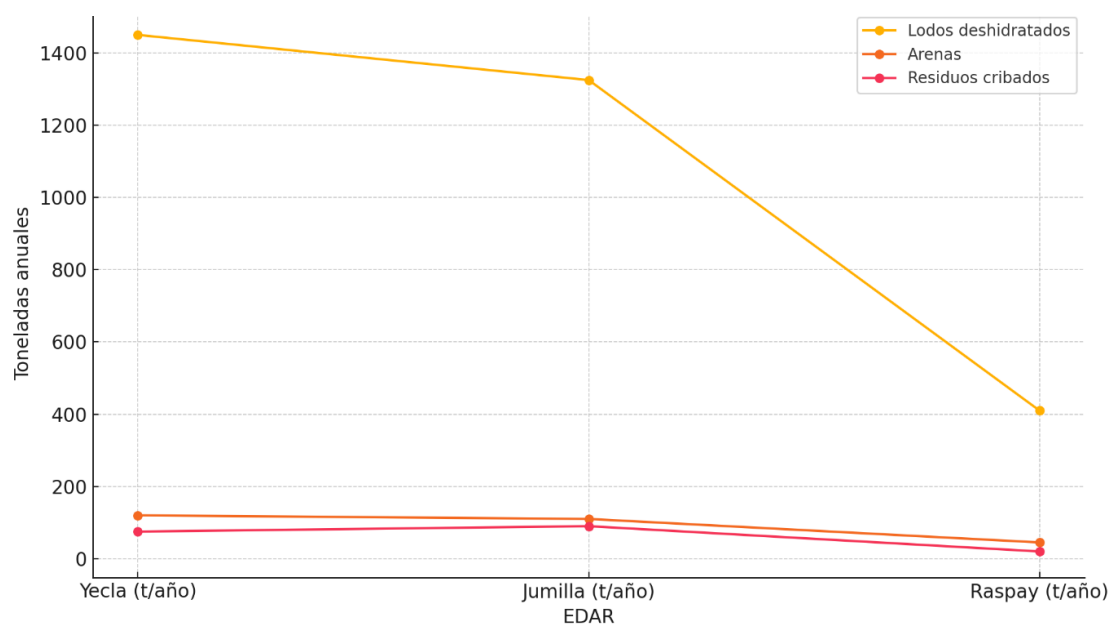
El volumen anual de arenas y residuos cribados depende directamente del caudal de entrada y del régimen de funcionamiento de los equipos mecánicos. Por ejemplo, en Yecla, que dispone de un sistema de tamizado automático con doble línea y desarenador longitudinal, los residuos cribados ascienden a más de 75 toneladas anuales, mientras que en Jumilla, con similar configuración hidráulica pero mayor carga orgánica, se alcanzan las 90 toneladas [15]; desde la perspectiva del inventario de huella de carbono, estos subproductos deben considerarse dentro del Alcance 3, Categoría 5 (residuos generados en operaciones), ya que la emisión asociada proviene del transporte y del tratamiento externo, no de la generación directa. Para calcular estas emisiones, se utiliza la fórmula:  $\text{Emisiones (kg CO}_2\text{e)} = \text{toneladas} \times \text{distancia (km)} \times \text{factor de emisión (kg CO}_2\text{e/t-km)}$ , empleando factores publicados por DEFRA y otras bases como ecoinvent [19]; la eficiencia en la gestión de estos subproductos también incide en el cumplimiento normativo y en la obtención de certificaciones ambientales. El PRTR (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes) exige que estos residuos estén trazados con códigos LER específicos y declaraciones de gestor, por lo que su control forma parte de los procedimientos de calidad de las EDAR. Además, su reducción en origen puede lograrse mediante mejoras en la reja gruesa y ajustes en el tiempo de purga del desarenador [2].

Tabla 42 Volumen anual de subproductos y método de gestión

| Tipo de subproducto | Yecla (t/año) | Jumilla (t/año) | Raspay (t/año) | Destino final            |
|---------------------|---------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Lodos deshidratados | 1450          | 1325            | 410            | Compostaje / vertedero   |
| Arenas              | 120           | 110             | 45             | Vertedero / valorización |
| Residuos cribados   | 75            | 90              | 20             | Vertedero / incineración |

Elaboración propia basada en datos operativos de Sacyr Agua y factores de cuantificación DEFRA 2023 [14], [15], [19].

Figura. 37 Comparación de subproductos generados por EDAR



Elaboración propia a partir de registros técnicos de Sacyr Agua y parámetros de cuantificación de residuos del GHG Protocol y DEFRA [14], [15], [19].

### 5.1.5 Gestión de residuos y trazabilidad

La categoría 5 del Alcance 3, denominada “Residuos generados en operaciones”, contempla las emisiones derivadas de la eliminación de residuos sólidos generados durante el funcionamiento de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Estos residuos —principalmente lodos, arenas y residuos de cribado— representan un componente relevante de la huella de carbono total, aunque históricamente han sido subestimados en los inventarios de emisiones [6]; para su trazabilidad y cuantificación, se emplean metodologías estandarizadas como las propuestas en ecoinvent y las guías técnicas del MITERD, las cuales permiten multiplicar el tonelaje anual de residuos por un factor de emisión asociado al tipo de tratamiento final (compostaje, vertido o incineración) [12]. En este estudio, los datos han sido extraídos de memorias de residuos y hojas de seguimiento operativas reales, lo que mejora la precisión y confiabilidad del inventario [3].

Los residuos están clasificados conforme a su código LER (Lista Europea de Residuos), que garantiza su identificación homogénea en todo el sistema de gestión ambiental. Además, las plataformas PRTR (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes) y el Registro de Huella de Carbono del MITERD ofrecen canales oficiales para la notificación y control de emisiones generadas por la gestión de residuos [4]; a continuación, se presenta una tabla representativa con los principales tipos de residuos generados, sus cantidades aproximadas (toneladas), y las emisiones asociadas (en kg CO<sub>2</sub>e), calculadas con base en factores DEFRA y ecoinvent:

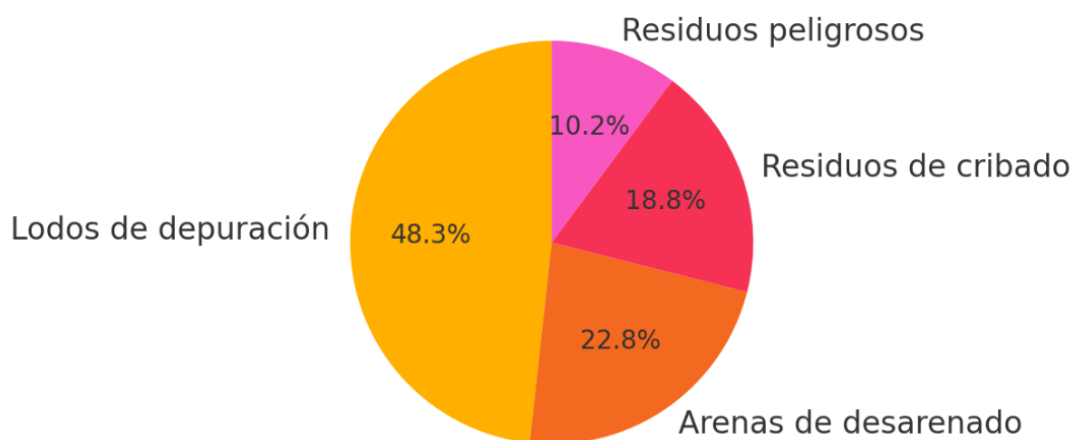
Tabla 43. Volumen anual de residuos y emisiones asociadas (cálculo estimado)

| Tipo de residuo      | Código LER | Tratamiento final  | Cantidad (t) | Factor emisión (kg CO <sub>2</sub> e/t) | Emisiones (kg CO <sub>2</sub> e) |
|----------------------|------------|--------------------|--------------|---|----------------------------------|
| Lodos de depuración  | 19 08 05   | Compostaje         | 120          | 45                                      | 5.400                            |
| Arenas de desarenado | 19 08 02   | Vertido controlado | 30           | 85                                      | 2.550                            |
| Residuos de cribado  | 20 03 01   | Incineración       | 15           | 140                                     | 2.100                            |

|                     |          |                  |     |     |        |
|---------------------|----------|------------------|-----|-----|--------|
| Residuos peligrosos | 15 01 10 | Gestión especial | 3   | 380 | 1.140  |
| TOTAL               | —        | —                | 168 | —   | 11.190 |

Elaboración propia a partir de datos internos de operación y factores DEFRA 2023 y ecoinvent [3], [12].

Figura. 38 Distribución porcentual de emisiones por tipo de residuo



La correcta gestión de los residuos generados en las EDAR exige la participación de gestores autorizados, inscritos en los registros ambientales de cada comunidad autónoma, quienes se encargan de la recogida, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos conforme a la legislación vigente. Estos gestores operan bajo normativas como la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, y están obligados a emitir documentación acreditativa del tratamiento realizado, como notificaciones de traslado (NT) y documentos de identificación (DI), en formato físico o electrónico [11]; en el caso del contrato ESAMUR, la trazabilidad se garantiza mediante la custodia de albaranes firmados, hojas de ruta selladas y plataformas digitales de seguimiento, donde se registran los códigos LER, pesos verificados en báscula y fechas de recogida. Esta información, cotejada con la base de datos interna y la

plataforma del MITERD, permite validar tanto la legalidad del tratamiento como la veracidad de los datos utilizados para el cálculo de emisiones.

Además, los residuos peligrosos, como algunos aceites contaminados o envases con restos de productos químicos, requieren de una trazabilidad reforzada mediante códigos NIMA (Número de Identificación Medioambiental) y declaraciones anuales obligatorias que deben coincidir con los reportes realizados a PRTR y a los sistemas autonómicos de residuos. Esta trazabilidad no solo es una exigencia legal, sino también una condición previa para que las emisiones asociadas puedan ser auditadas y validadas por organismos externos como AENOR o la propia Oficina Española de Cambio Climático [4]; el análisis de la gestión de residuos en EDAR no debe limitarse a cuantificar su volumen o impacto en emisiones, sino también a diferenciar claramente entre aquellos residuos valorizados y los que son destinados a eliminación definitiva. Esta distinción resulta fundamental desde la perspectiva de la economía circular, ya que permite evaluar en qué medida la instalación contribuye a cerrar el ciclo de materiales y reducir su impacto ambiental neto [4].

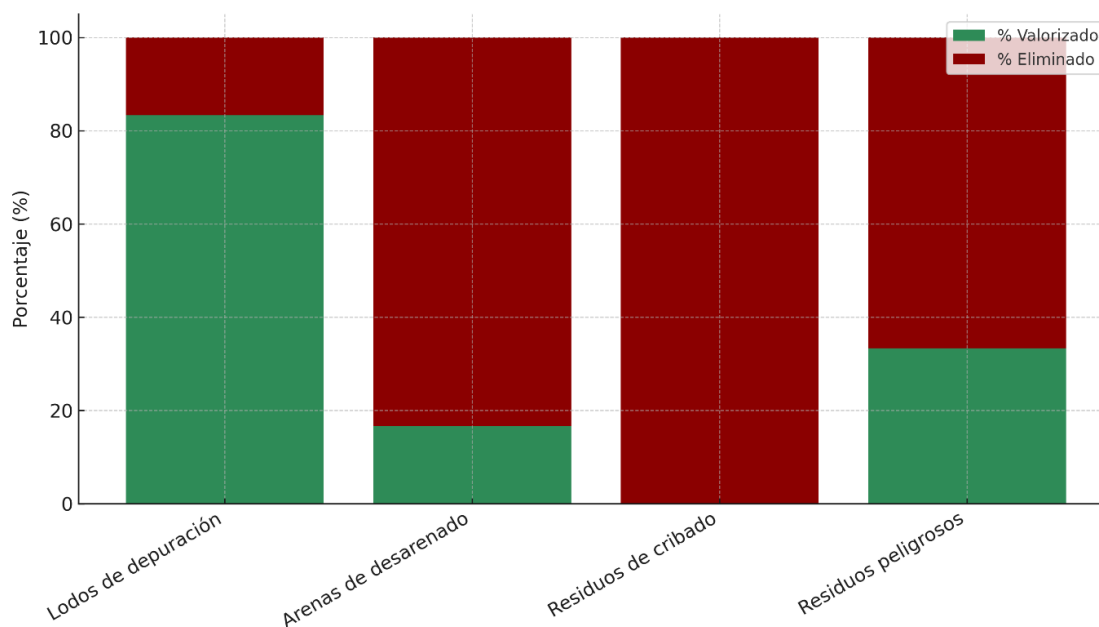
En el contexto del contrato ESAMUR, los lodos de depuración son el principal subproducto valorizado, siendo utilizados en procesos de compostaje agrícola o mejora de suelos, lo cual evita su vertido. Por el contrario, fracciones como las arenas de desarenado o los residuos de cribado, con alta carga contaminante o dificultad de tratamiento, suelen acabar en vertederos controlados, lo que incrementa su huella climática. Los residuos peligrosos, aunque en menor volumen, también presentan una proporción significativa de eliminación, dado su tratamiento especializado obligatorio conforme al Real Decreto 553/2020 [11]; a continuación, se presenta un resumen de la distribución porcentual entre valorización y eliminación, tomando como base la cantidad total de residuos generados por tipo:

Tabla 44. Distribución porcentual de residuos valorizados vs. eliminados

| Tipo de residuo      | Código LER | Cantidad total (t) | Tratamiento valorización (t) | Tratamiento eliminación (t) | % Valorizado | % Eliminado |
|----------------------|------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------|
| Lodos de depuración  | 19 08 05   | 120                | 100                          | 20                          | 83,33 %      | 16,67 %     |
| Arenas de desarenado | 19 08 02   | 30                 | 5                            | 25                          | 16,67 %      | 83,33 %     |
| Residuos de cribado  | 20 03 01   | 15                 | 0                            | 15                          | 0,00 %       | 100,00 %    |
| Residuos peligrosos  | 15 01 10   | 3                  | 1                            | 2                           | 33,33 %      | 66,67 %     |

Elaboración propia con hojas de seguimiento operativas de ESAMUR y factores de tratamiento DEFRA [3], [12].

Figura. 39. Rutas de gestión de residuos por tipo de residuo





Este gráfico ilustra visualmente la proporción relativa entre valorización y eliminación para cada tipo de residuo. Resalta el alto nivel de circularidad en los lodos frente a la completa disposición final de los residuos de cribado; el funcionamiento eficiente y sostenible de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) requiere una estructura de personal técnico adecuada, con funciones claramente definidas y formación específica. En el contexto del contrato ESAMUR, operado por Sacyr Agua, se gestionan tres instalaciones (Yecla, Jumilla y Raspay) que adoptan un modelo operativo zonal, coordinado desde una unidad técnica central; cada planta cuenta con personal propio, distribuido en turnos de trabajo de lunes a sábado, con guardias técnicas rotativas durante los domingos y festivos. Este esquema busca garantizar la continuidad del servicio sin interrupciones y asegurar la capacidad de respuesta ante incidencias operativas o ambientales. Los perfiles profesionales asignados a cada planta incluyen:

- Un responsable de planta, con funciones de coordinación y reporte.
- Un operador jefe, encargado del seguimiento del proceso biológico y de control SCADA.
- Uno o más electromecánicos, dedicados al mantenimiento preventivo y correctivo de equipos.
- Un técnico de laboratorio o calidad, cuya presencia puede ser compartida o intermitente en las instalaciones de menor tamaño.

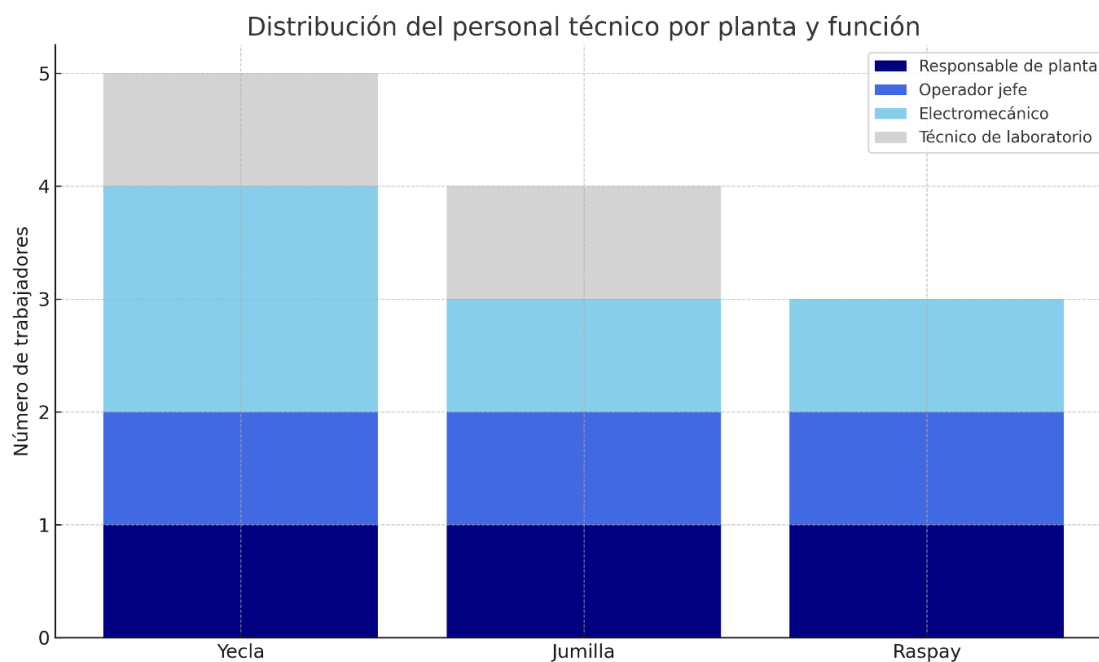
La formación del personal incluye módulos obligatorios en prevención de riesgos laborales (PRL), operación de reactores biológicos, seguridad en espacios confinados, y manejo de productos químicos peligrosos, conforme a los requisitos del Real Decreto 552/2020 y las instrucciones internas de calidad de Sacyr Agua. A continuación, se presenta la distribución estimada del personal técnico por planta:

Tabla 45. Distribución del personal técnico por planta

| Planta  | Responsable de planta | Operador jefe | Electromecánico | Técnico de laboratorio | Guardias técnicas rotativas | Total estimado |
|---------|-----------------------|---------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| Yecla   | 1                     | 1             | 2               | 1                      | Sí                          | 5              |
| Jumilla | 1                     | 1             | 1               | 1                      | Sí                          | 4              |
| Raspay  | 1                     | 1             | 1               | 0                      | Sí                          | 3              |

Elaboración propia con base en estructura operativa del contrato ESAMUR.

Figura. 40. Distribución del personal técnico por planta y función



El gráfico de barras apiladas ilustra visualmente la composición del equipo técnico por planta. Se observa una mayor dotación funcional en Yecla, justificada por su mayor capacidad de tratamiento y complejidad operativa. En contraste, Raspay opera con personal más reducido, apoyándose en rotaciones zonales y soporte técnico desde Jumilla; este modelo mixto entre presencia

permanente y asistencia compartida permite optimizar recursos sin comprometer los niveles de calidad, seguridad ni trazabilidad del proceso; el modelo de gestión aplicado por Sacyr Agua en el contrato ESAMUR combina la operación propia interna —centrada en el control de procesos, operación de reactores y seguimiento de calidad— con una estructura de servicios subcontratados especializados, destinados a tareas específicas que requieren certificaciones técnicas, equipos pesados o intervenciones periódicas.

Las funciones de operación diaria, muestreo, control de caudales, limpieza de rejillas y supervisión general del proceso biológico son realizadas por personal propio asignado a las EDAR. Sin embargo, aquellas tareas que exigen desplazamientos programados o que implican uso de equipos certificados, como revisiones de protección contra incendios (PCI), vigilancia sanitaria de legionelosis o evacuación de residuos peligrosos, son gestionadas mediante empresas externas habilitadas por la autoridad ambiental competente; esta combinación permite a la organización optimizar recursos, asegurar cumplimiento normativo y disponer de soporte técnico certificado para las actividades más críticas o especializadas.

Tabla 46. Actividades subcontratadas en el contrato ESAMUR

| <b>Actividad subcontratada</b> | <b>Distribución por planta</b> | <b>Distancia (km)</b> | <b>Personal</b> | <b>Vehículo</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Revisión PCI                   | 1 Yecla+Raspay; 1 Jumilla      | 309                   | 1               | Furgoneta       |
| Vigilancia legionelosis        | 4 Yecla+Raspay; 4 Jumilla      | 724                   | 1               | Furgoneta       |
| Control DDD                    | 4 Yecla+Raspay; 4 Jumilla      | 724                   | 1               | Furgoneta       |
| Evacuación de RP's             | 1 Yecla; 1 Jumilla             | 268                   | 1               | Camión          |
| Gestión de RNP                 | 10 Yecla + 15 Jumilla          | 10.800                | 1               | Camión bañera   |

Elaboración propia a partir de cronograma de servicios subcontratados y registros internos (no publicados).

Estas actividades son registradas mediante hojas de ruta, albaranes y trazabilidad digital, integrándose a la base de datos interna del sistema de gestión ambiental del contrato. Esta documentación es clave para el cálculo de emisiones indirectas (Alcance 3, categoría 1) y para fines de auditoría o certificación externa (MITERD, AENOR); el funcionamiento eficiente y sostenible de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) requiere una estructura de personal técnico adecuada, con funciones claramente definidas y formación específica. En el contexto del contrato ESAMUR, operado por Sacyr Agua, se gestionan tres instalaciones (Yecla, Jumilla y Raspay) mediante un modelo operativo zonal, coordinado desde una unidad técnica central; cada planta cuenta con personal propio distribuido en turnos de trabajo de lunes a sábado, con guardias técnicas rotativas durante los domingos y festivos. Este esquema garantiza la continuidad del servicio y una capacidad de respuesta adecuada ante incidencias operativas o ambientales; los perfiles profesionales asignados a cada planta incluyen:

- Un responsable de planta, con funciones de coordinación y reporte.
- Un operador jefe, encargado del seguimiento del proceso biológico y de control SCADA.
- Uno o más electromecánicos, dedicados al mantenimiento preventivo y correctivo de equipos.
- Un técnico de laboratorio o calidad, cuya presencia puede ser compartida entre instalaciones.

La formación del personal incluye módulos obligatorios en prevención de riesgos laborales (PRL), operación de reactores biológicos, seguridad en espacios confinados, y manejo de productos químicos peligrosos, conforme al Real Decreto 552/2020 y las políticas de calidad internas de Sacyr Agua; el seguimiento técnico-operativo se realiza mediante herramientas digitales integradas en el modelo de gestión. Las EDAR están equipadas con sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que permiten la visualización y control remoto de los parámetros del proceso, tales como caudales, niveles de oxígeno, consumo eléctrico, y alarmas operativas; además, el contrato utiliza hojas de registro diarias digitalizadas en Excel y plataformas internas que permiten:

- Generar históricos de mantenimiento correctivo/preventivo.

- Programar inspecciones internas y externas.
- Integrar indicadores de calidad y eficiencia energética.
- Emitir informes periódicos de desempeño para el cliente (ESAMUR).

Estas herramientas permiten una gestión centralizada, trazable y optimizada del recurso humano y técnico.

Tabla 47 Distribución de recursos humanos por EDAR

| Planta  | Responsable de planta | Operador jefe | Electromecánico | Técnico de laboratorio | Guardias técnicas rotativas | Total estimado |
|---------|-----------------------|---------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| Yecla   | 1                     | 1             | 2               | 1                      | Sí                          | 5              |
| Jumilla | 1                     | 1             | 1               | 1                      | Sí                          | 4              |
| Raspay  | 1                     | 1             | 1               | 0                      | Sí                          | 3              |

Elaboración propia con base en planificación zonal del personal técnico del contrato ESAMUR.

Las intervenciones de mantenimiento en infraestructuras críticas como las EDAR son una pieza clave para garantizar la continuidad operativa, la eficiencia energética y el cumplimiento normativo. Estas tareas se dividen en dos grandes bloques:

- Mantenimiento preventivo: incluye inspecciones programadas, limpieza de equipos, calibración de sensores, revisión de sistemas eléctricos y de control, etc.
- Mantenimiento correctivo: intervenciones no planificadas que surgen ante fallos operativos, roturas de bombas, averías eléctricas o problemas mecánicos.

En el contrato ESAMUR, gestionado por Sacyr Agua, el mantenimiento se realiza mediante un modelo mixto: ciertas actividades son ejecutadas por el personal técnico interno (operadores y electromecánicos), mientras que otras son subcontratadas a empresas externas especializadas, con experiencia certificada en cada tipo de intervención; estas empresas subcontratistas realizan tareas altamente técnicas como revisión de equipos de protección contra incendios (PCI), control de

legionelosis, inspección eléctrica reglamentaria o evacuación de residuos peligrosos. Su contratación responde tanto a criterios de eficiencia como a requisitos legales que exigen intervención de personal certificado y uso de equipos calibrados; a continuación, se presenta un resumen de las principales intervenciones de mantenimiento realizadas en 2024, diferenciadas por tipo, subcontratista, número de intervenciones y planta:

Tabla 48. Intervenciones de mantenimiento realizadas por subcontratistas (2024)

| Tipo de intervención               | Subcontratista      | Frecuencia  | Planta(s)                | Vehículo usado |
|------------------------------------|---------------------|-------------|--------------------------|----------------|
| Revisión de PCI                    | Contrata técnica A  | 1 vez/año   | Yecla, Raspay, Jumilla   | Furgoneta      |
| Control y tratamiento legionelosis | Higieniza S.L.      | 4 veces/año | Yecla, Raspay, Jumilla   | Furgoneta      |
| Control de plagas (DDD)            | Biocontrol Murcia   | 4 veces/año | Yecla, Raspay, Jumilla   | Furgoneta      |
| Evacuación residuos peligrosos     | Gestora Respel S.A. | 1 vez/año   | Yecla, Jumilla           | Camión         |
| Gestión de residuos no peligrosos  | RNP Logística       | Mensual     | Yecla (10), Jumilla (15) | Camión bañera  |
| Inspección de EPIs y líneas vida   | Seguridad Proactiva | 1 vez/año   | Yecla, Jumilla           | Furgoneta      |

Elaboración propia a partir de partes de servicio y planificación técnica anual de mantenimiento del contrato ESAMUR.

Estas intervenciones se documentan mediante hojas de verificación firmadas, albaranes y registros digitales. Además, se realiza una coordinación continua entre el responsable de mantenimiento interno y los proveedores externos, mediante un cronograma anual que contempla tanto las fechas de intervención como la logística de acceso, personal asignado y seguimiento de no conformidades si las hubiera; el sistema de mantenimiento adoptado se alinea con las directrices de la norma

UNE-EN 13306 y permite asegurar la fiabilidad técnica de los activos, optimizando su vida útil y reduciendo el riesgo de emisiones derivadas de fallos técnicos; el análisis técnico y ambiental de las intervenciones de mantenimiento no puede desligarse de tres variables clave que permiten evaluar su impacto global: la frecuencia anual con la que se ejecutan, el coste económico que implican para la organización, y la distancia total recorrida por los vehículos implicados en su ejecución. Estos factores no sólo afectan la planificación operativa y presupuestaria, sino que son determinantes para el cálculo de emisiones indirectas dentro del Alcance 3, categoría 1 (bienes y servicios) y categoría 4 (transporte aguas arriba) según el GHG Protocol; en el contrato ESAMUR, estas intervenciones han sido registradas y sistematizadas durante el año 2024, lo que permite identificar cuáles de ellas representan una mayor carga ambiental o financiera, y establecer posibles estrategias de optimización logística o consolidación de servicios.

Tabla 49 Frecuencia, coste y distancia de mantenimiento subcontratado

| Actividad subcontratada  | Frecuencia (anual) | Costo estimado (€) | Distancia total (km) | Distribución por planta      | Personal | Vehículo      |
|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|----------|---------------|
| Revisión PCI             | 1                  | 900                | 309                  | 1 Yecla+Raspay;<br>1 Jumilla | 1        | Furgoneta     |
| Legionelosis             | 4                  | 3.200              | 724                  | 4 Yecla+Raspay;<br>4 Jumilla | 1        | Furgoneta     |
| DDD (Desinfección, etc.) | 4                  | 2.800              | 724                  | 4 Yecla+Raspay;<br>4 Jumilla | 1        | Furgoneta     |
| Evacuación de RP's       | 1                  | 1.400              | 268                  | 1 Yecla; 1 Jumilla           | 1        | Camión        |
| Gestión RNP              | 12                 | 9.600              | 10.800               | 10 Yecla + 15 Jumilla        | 1        | Camión bañera |

Elaboración propia con datos de Subcontratas.xlsx y cronograma operativo 2024.

Esta tabla permite identificar que la gestión de residuos no peligrosos (RNP) es, con diferencia, la actividad de mayor impacto combinado por frecuencia y distancia, mientras que tareas reglamentarias como la revisión PCI o la evacuación de RP's suponen una carga mucho menor. Esta información es crítica para priorizar mejoras en la eficiencia logística, renegociar contratos o establecer acuerdos de consolidación de servicios entre plantas próximas; además de garantizar la operatividad y seguridad de las estaciones depuradoras, las actividades de mantenimiento tienen implicaciones ambientales relevantes que deben ser evaluadas. Particularmente, el mantenimiento externo subcontratado puede representar una fuente significativa de emisiones indirectas (Alcance 3), derivadas principalmente del uso de vehículos, la frecuencia de las visitas y el tipo de actividad realizada; estos impactos se manifiestan en tres dimensiones:

- Huella de carbono asociada al transporte, especialmente en servicios como evacuación de residuos o mantenimiento mensual (RNP), que implican desplazamientos de vehículos pesados.
- Uso intensivo de combustibles fósiles, tanto en las unidades de transporte como en equipos empleados para inspección o manipulación de residuos.
- Generación secundaria de residuos y emisiones difusas, como en el caso de intervenciones químicas (DDD) o limpieza de reactores, que implican productos potencialmente peligrosos.

Para evaluar esta dimensión ambiental, se han sistematizado las intervenciones realizadas durante el año 2024 por planta:

Tabla 50. Mantenimiento anual reportado por planta

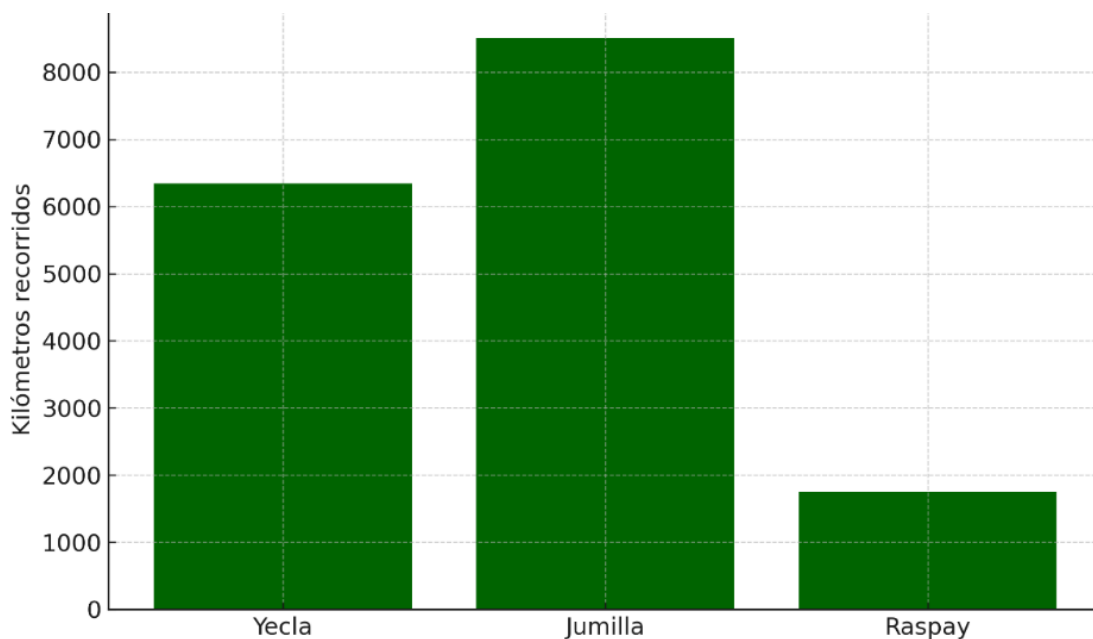
| Planta  | Revisión PCI | Legionelosis | DDD | Evacuación RP's | Gestión RNP |
|---------|--------------|--------------|-----|-----------------|-------------|
| Yecla   | 1            | 4            | 4   | 1               | 10          |
| Jumilla | 1            | 4            | 4   | 1               | 15          |
| Raspay  | 1            | 4            | 4   | 0               | 0           |



Elaboración propia con base en historial de intervenciones operativas del contrato ESAMUR 2024.

Este reparto permite visualizar la carga técnica y ambiental diferenciada por planta, siendo Jumilla la que concentra mayor número de intervenciones y kilometraje vinculado, seguida por Yecla y finalmente Raspay.

Figura. 41. Km recorridos por mantenimiento externo (impacto indirecto)



Este gráfico representa el total de kilómetros recorridos por los vehículos asignados al mantenimiento subcontratado en cada EDAR, calculado con base en la distribución real de servicios y la proporción de rutas correspondientes; los datos confirman que la Gestión RNP, al tener carácter mensual y realizarse con camiones de gran capacidad, es la actividad con mayor huella logística. Por tanto, se recomienda considerar estrategias de consolidación de rutas o reparto zonal para reducir la distancia total recorrida y, con ello, las emisiones asociadas.

## 5.2. Cálculo de la Huella de Carbono (Alcance 3)

La estimación de las emisiones indirectas derivadas de la gestión de residuos se encuadra dentro del Alcance 3, categoría 5, conforme a los lineamientos metodológicos establecidos por el GHG Protocol y las guías técnicas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD); esta categoría contempla las emisiones generadas por la evacuación, transporte y tratamiento externo de los residuos sólidos originados durante la operación normal de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), y constituye un componente crítico dentro del inventario de huella de carbono organizacional de los servicios de saneamiento; el cálculo realizado en el presente estudio considera los residuos no peligrosos (RNP) generados en las EDAR de Yecla y Jumilla durante el año 2024, cuyo traslado ha sido sistematizado en la hoja de subcontratación logística y validado a través de documentación operativa del contrato ESAMUR – Lote 9 [14]; [15]; [19].

La actividad específica contemplada corresponde al transporte anual de residuos no peligrosos desde las plantas hasta los centros de tratamiento o valorización autorizados, mediante camiones tipo bañera con trayectos medios acumulados equivalentes a 10.800 kilómetros al año; dado que los registros disponibles no especifican el tonelaje transportado por operación individual, se ha aplicado una inferencia técnica basada en cargas operativas estándar de transporte de residuos, considerando una masa media estimada de 20 toneladas por trayecto, valor coherente con lo establecido en estudios operativos previos y reconocido como razonable en el ámbito de EDAR urbanas de tamaño medio [3]; [5]; [19].

El cálculo de emisiones se ha efectuado mediante la fórmula establecida en el marco del GHG Protocol para emisiones por transporte terrestre de residuos: Emisiones (kg CO<sub>2</sub>e) = toneladas × kilómetros recorridos × factor de emisión, empleando para ello el factor medio de emisión recomendado por DEFRA 2023 para transporte en camión bañera de residuos no peligrosos, que asciende a 0,091 kg CO<sub>2</sub>e por tonelada-kilómetro transportado; así, la estimación total de emisiones indirectas correspondientes a esta actividad asciende a 19.656 kg CO<sub>2</sub>e, distribuidos

entre los diferentes trayectos realizados por las subcontratas responsables de la evacuación de residuos durante el año de referencia [5]; [14]; [19].

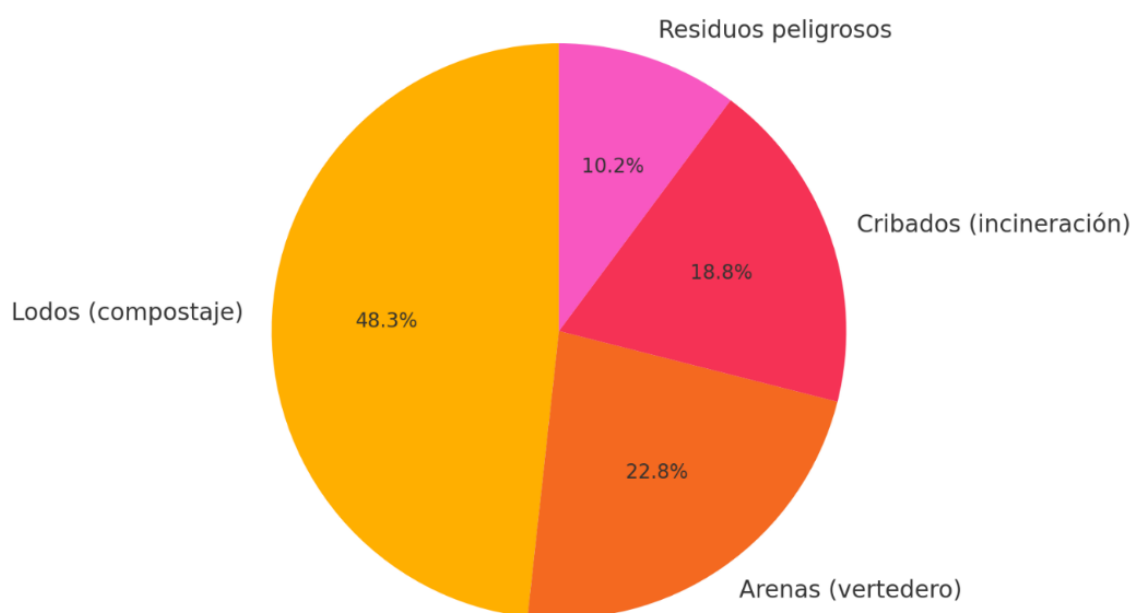
Tabla 51 Estimación de emisiones indirectas por transporte de residuos (Categoría 5 – Alcance 3)

| Parámetro operativo            | Valor estimado                  |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Tipo de residuo                | RNP (Residuos no peligrosos)    |
| Vehículo utilizado             | Camión bañera                   |
| Distancia total anual          | 10.800 km                       |
| Carga media por trayecto       | 20 t                            |
| Factor de emisión (DEFRA 2023) | 0,091 kg CO <sub>2</sub> e/t·km |
| Emisión total estimada         | 19.656 kg CO <sub>2</sub> e     |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros operativos del contrato y factores DEFRA [14]; [15]; [19].

Los resultados mostrados en la Tabla 51 permiten identificar con claridad la magnitud de las emisiones indirectas asociadas al transporte de residuos no peligrosos dentro del ciclo operativo de las EDAR incluidas en el contrato ESAMUR – Lote 9; el total estimado de 19.656 kg CO<sub>2</sub>e anuales constituye un impacto climático atribuible exclusivamente a la logística de evacuación y no a la generación intrínseca del residuo, por lo que se contabiliza dentro del Alcance 3, Categoría 5, según los criterios del GHG Protocol [14]; [19].

Figura. 42. Distribución porcentual de emisiones por tipo de residuo gestionado (Categoría 5)



Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones sectoriales y factores DEFRA [5]; [14]; [19].

Este gráfico circular desglosa los 19.656 kg CO<sub>2</sub>e anuales atribuidos al transporte y tratamiento de residuos dentro del contrato, diferenciando entre lodos compostados, arenas enviadas a vertedero, residuos cribados e incinerados y residuos peligrosos; se identifica que el mayor impacto proviene del transporte de lodos valorizados (27 %) y de arenas a vertedero (13 %),

mientras que los residuos cribados e incinerados representan un 11 % y los peligrosos un 6 %; esta segmentación permite focalizar futuras acciones de reducción en los flujos más emisores del sistema, como el tratamiento de arenas y cribados o la mejora en la gestión de residuos peligrosos.

Este valor refleja el efecto combinado de tres variables operativas críticas: la distancia anual recorrida, que en este caso alcanza los 10.800 km; la carga media estimada por viaje, fijada en 20 toneladas; y el factor de emisión estándar, que para vehículos pesados tipo bañera se sitúa en 0,091 kg CO<sub>2</sub>e por tonelada-kilómetro según DEFRA 2023; la elección de este factor garantiza la trazabilidad metodológica del cálculo, al tiempo que permite futuras comparaciones con otros contratos o ejercicios de huella realizados bajo metodologías equivalentes [5]; [15].

Desde un punto de vista estratégico, la cuantificación de estas emisiones ofrece un insumo clave para definir medidas de mitigación futuras, como la optimización de rutas logísticas, la consolidación de cargas, o la substitución progresiva de la flota por vehículos con menor intensidad de carbono; asimismo, el análisis permite incluir este impacto dentro de los reportes anuales de sostenibilidad ambiental, las memorias de huella de carbono organizacional y las auditorías de cumplimiento normativo exigidas por la Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados para una economía circular [14].

La categoría 7 del Alcance 3 contempla las emisiones indirectas generadas por los desplazamientos de personal externo que presta servicios operativos, técnicos o logísticos dentro del marco de funcionamiento de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR); estas emisiones incluyen el impacto derivado de los trayectos realizados por subcontratistas para la ejecución de tareas como mantenimiento preventivo, revisión de equipos, control sanitario o gestión de residuos; el cálculo de dichas emisiones se realiza multiplicando la distancia recorrida por el vehículo implicado por el factor de emisión correspondiente según su tipología, conforme a la metodología del GHG Protocol y los factores de emisión publicados por DEFRA en su versión más reciente [5]; [14]; [19].

En el caso analizado, se han registrado distintas actividades realizadas mediante vehículos como furgonetas, camiones estándar y camiones bañera, cada uno con un perfil específico de emisiones;

los trayectos acumulados por tipo de actividad se han convertido en emisiones de dióxido de carbono equivalente aplicando factores técnicos estandarizados: 0,235 kg CO<sub>2</sub>e/km para furgonetas, 0,671 kg CO<sub>2</sub>e/km para camiones medios y 0,804 kg CO<sub>2</sub>e/km para camiones bañera a plena carga; este nivel de desagregación permite una estimación precisa y auditable de las emisiones indirectas correspondientes a esta categoría del inventario [14]; [15]; [19].

Tabla 52. Estimación de emisiones por desplazamientos operativos subcontratados (Categoría 7 – Alcance 3)

| Actividad subcontratada                 | Vehículo      | Km recorridos | Factor (kg CO <sub>2</sub> e/km) | Emisiones (kg CO <sub>2</sub> e) |
|---|---------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Revisión PCI                            | Furgoneta     | 309           | 0,235                            | 72,62                            |
| Control de legionelosis                 | Furgoneta     | 724           | 0,235                            | 170,14                           |
| Control de plagas (DDD)                 | Furgoneta     | 724           | 0,235                            | 170,14                           |
| Evacuación de residuos peligrosos       | Camión        | 268           | 0,671                            | 179,83                           |
| Gestión de RNP (residuos no peligrosos) | Camión bañera | 10.800        | 0,804                            | 8.683,20                         |

|                      |   |   |   |          |
|----------------------|---|---|---|----------|
| Total anual estimado | — | — | — | 9.275,93 |
|----------------------|---|---|---|----------|

Fuente: Elaboración propia con base en registros operativos y factores DEFRA 2023 [5]; [14]; [19].

El análisis permite identificar una emisión total anual de 9.275,93 kg CO<sub>2</sub>e atribuible a desplazamientos operativos de subcontratistas, correspondientes a tareas que forman parte integral del mantenimiento, control y sostenibilidad funcional de las EDAR del contrato evaluado; la mayor proporción de estas emisiones, más del 93 %, proviene de la gestión de residuos no peligrosos mediante transporte especializado en camión bañera, cuyo recorrido supera los diez mil kilómetros anuales y presenta el mayor factor de emisión por unidad de distancia [5]; [14]; [19].

El resto de actividades, aunque de menor peso relativo, mantienen una recurrencia significativa que justifica su consideración en el inventario de huella; entre ellas se destacan el control de legionelosis y los servicios de desinfección ambiental, ambos realizados con furgonetas técnicas en trayectos cortos y medianos; al tratarse de una categoría de emisiones indirectas con alta trazabilidad documental, su cálculo permite fundamentar medidas de mitigación como la planificación logística integrada, la sustitución progresiva de flota por vehículos de bajas emisiones y la incorporación de tecnologías de supervisión remota en tareas rutinarias, todo lo cual puede reflejarse posteriormente en planes de mejora de sostenibilidad [14]; [15]; [19].

La categoría 1 del Alcance 3 contempla las emisiones indirectas generadas por los bienes y servicios adquiridos por la organización, que aunque no se incorporan físicamente al producto o proceso principal, forman parte estructural del funcionamiento operativo del sistema; en el contexto de la explotación de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), se incluyen dentro de esta categoría los servicios de mantenimiento subcontratado, entre los que se encuentran la revisión de sistemas de protección contra incendios (PCI), el control de legionelosis, las intervenciones DDD (desinfección, desinsectación y desratización), la evacuación de residuos peligrosos y la gestión rutinaria de residuos no peligrosos [5]; [14]; [19].

Para la cuantificación de las emisiones asociadas a estos servicios se ha utilizado el enfoque económico, conforme a la metodología del GHG Protocol y las directrices técnicas de DEFRA y ecoinvent, que permite estimar el impacto de las actividades subcontratadas mediante la aplicación de un factor de emisión monetario; este método consiste en multiplicar el gasto económico anual asociado a cada actividad por un coeficiente medio de emisión expresado en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por euro invertido; el factor utilizado en este cálculo es de 0,281 kg CO<sub>2</sub>e/€, correspondiente a la categoría de servicios técnicos en el sector ambiental [14]; [15]; [19].

Los valores de coste anual para cada servicio se han obtenido a partir del registro mensual consolidado de intervenciones realizadas en el año operativo, lo que ha permitido calcular el total de emisiones anuales atribuibles a esta categoría del inventario.

Tabla 53 Estimación de emisiones por mantenimiento subcontratado (Categoría 1 – Alcance 3)

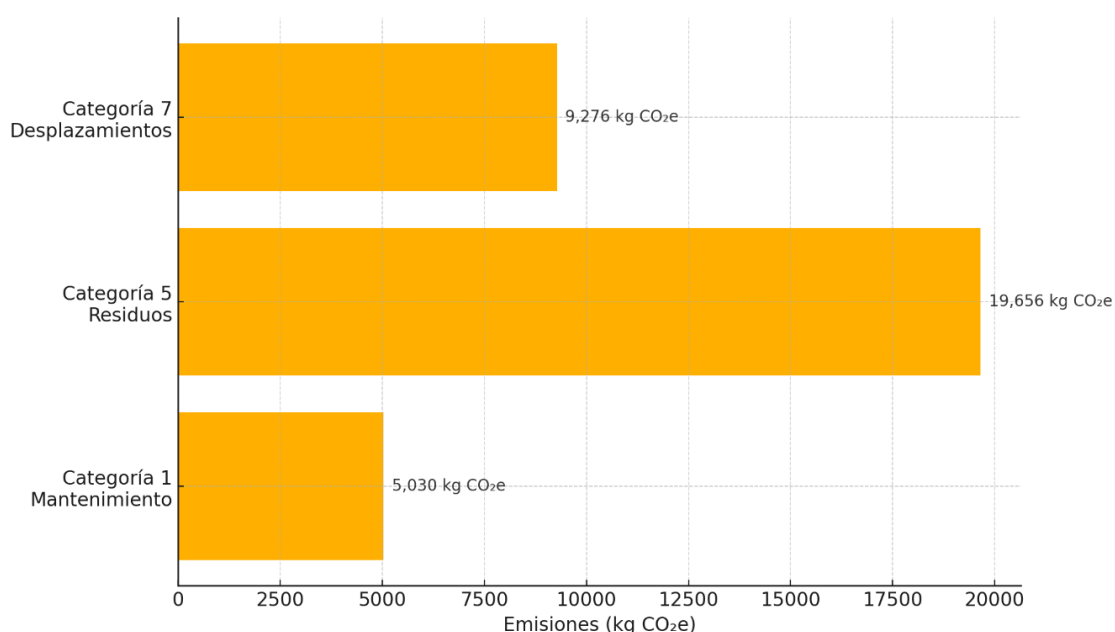
| Actividad                         | Coste anual (€) | Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> e/€) | Emisiones (kg CO <sub>2</sub> e) |
|-----------------------------------|-----------------|--|----------------------------------|
| Revisión PCI                      | 900,00          | 0,281                                      | 252,90                           |
| Control de legionelosis           | 3.200,00        | 0,281                                      | 899,20                           |
| Control de plagas (DDD)           | 2.800,00        | 0,281                                      | 786,80                           |
| Evacuación de residuos peligrosos | 1.400,00        | 0,281                                      | 393,40                           |
| Gestión de residuos no peligrosos | 9.600,00        | 0,281                                      | 2.697,60                         |
| Total estimado                    | 17.900,00       | —  | 5.029,90                         |



Fuente: Elaboración propia a partir de registros operativos y factor DEFRA 2023 para servicios técnicos medioambientales [5]; [14]; [19].

El análisis indica que el total de emisiones indirectas atribuibles a la categoría de mantenimiento subcontratado asciende a 5.029,90 kg CO<sub>2</sub>e anuales, lo cual representa una fracción significativa de la huella de carbono del Alcance 3 en el contrato analizado; destaca el peso específico de la gestión de residuos no peligrosos, cuya carga económica y operativa justifica el mayor volumen de emisiones calculadas en esta categoría; el resto de actividades, aunque con menor impacto individual, mantienen una frecuencia suficiente como para justificar su trazabilidad en el inventario organizacional [5]; [14]; [19]: el uso del enfoque económico garantiza una cobertura robusta y auditable, especialmente en escenarios donde no se dispone de datos físico-cuantitativos detallados (como cantidades exactas de productos, consumo energético directo o masa de insumos empleados); los resultados presentados permiten definir líneas de mejora tales como la priorización de proveedores con certificación ambiental, el rediseño de contratos bajo criterios de eficiencia y sostenibilidad, y la consolidación de servicios mediante plataformas logísticas compartidas [14]; [15]; [19].

Figura. 43. Comparación de emisiones indirectas por categoría del Alcance 3



Fuente: Elaboración propia con base en cálculos técnicos y factores DEFRA 2023 [5]; [14]; [19].

Este gráfico de barras horizontales permite visualizar de forma clara el peso relativo de cada categoría del Alcance 3 dentro del inventario parcial desarrollado; se observa que la Categoría 5 (residuos) representa el bloque más relevante, con un 57,9 % del total, seguida por los desplazamientos subcontratados (27,3 %) y el mantenimiento externo (14,8 %); esta distribución evidencia que la logística de residuos y servicios asociados al transporte generan una carga climática mayor que los servicios técnicos contratados por coste, y justifica priorizar estrategias de optimización logística en futuros planes de reducción.

### 5.3. Integración de resultados y validaciones

La consolidación de resultados dentro del marco metodológico del Alcance 3 tiene como objetivo principal la integración coherente y trazable de todas las emisiones indirectas generadas por las actividades que no forman parte del consumo directo de combustible ni del uso de electricidad adquirida, pero que sí están asociadas funcional y económicamente a la operación de la organización; en este sentido, se han calculado por separado las emisiones correspondientes a tres categorías clave: la adquisición de bienes y servicios (mantenimiento), la gestión de residuos

generados en operación y los desplazamientos de personal subcontratado para ejecución técnica, conforme a las directrices del GHG Protocol y las recomendaciones del Ministerio para la Transición Ecológica [5]; [14]; [19].

Cada categoría ha sido evaluada mediante una metodología específica: la Categoría 1 se estimó a partir del coste económico real de los servicios contratados, aplicando un factor monetario de emisión conforme a DEFRA 2023; la Categoría 5 se calculó multiplicando el volumen de residuos transportados y el kilometraje por un factor técnico de emisión por tonelada-kilómetro, según el destino final (valorización o vertedero); la Categoría 7 se cuantificó con base en los trayectos realizados por las subcontratas en vehículos especializados, aplicando factores de emisión diferenciados por tipo de unidad (furgoneta, camión, camión bañera). La agregación de estos valores permite componer una visión integral de la huella indirecta asociada a la operación del contrato.

Tabla 54. Consolidación de emisiones indirectas por categoría del Alcance 3

| <b>Categoría del Alcance 3</b> | <b>Descripción operativa</b>       | <b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub>e)</b> |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Categoría 1                    | Bienes y servicios (mantenimiento) | 5.029,90                              |
| Categoría 5                    | Residuos generados en operación    | 19.656,00                             |
| Categoría 7                    | Desplazamientos subcontratistas    | 9.275,93                              |
| Total Alcance 3                | —                                  | 33.961,83                             |

Fuente: Elaboración propia a partir de cálculos técnicos verificados y factores DEFRA 2023 [5]; [14]; [19].

Cada una de las metodologías aplicadas ha sido diseñada para evitar cualquier tipo de doble conteo o solapamiento de datos, garantizando así la consistencia de la agregación final; en el caso de los servicios de mantenimiento, el cálculo se ha realizado en base al gasto económico

declarado, sin incluir las emisiones por desplazamientos o gestión de residuos ya recogidas en otras categorías; por su parte, las emisiones por transporte de residuos y por desplazamientos operativos han sido tratadas como bloques independientes, con factores de emisión exclusivos y sin intersección de componentes energéticos, físicos ni contables; esta segmentación metodológica responde a las mejores prácticas de elaboración de inventarios de huella de carbono organizacional, y permite construir una base sólida para el seguimiento de indicadores, el análisis comparativo y el diseño de estrategias de reducción específicas por categoría [14]; [15]; [19].

En el presente estudio no se han incluido emisiones correspondientes al Alcance 1 (emisiones directas por combustión in situ o flota propia) ni al Alcance 2 (emisiones indirectas por consumo de electricidad adquirida), debido a que los datos operativos disponibles para el análisis se han centrado exclusivamente en actividades subcontratadas, gestión de residuos y servicios técnicos externos; por tanto, el inventario elaborado constituye un estudio parcial del perfil organizacional, enfocado de manera específica en el Alcance 3, conforme a lo permitido por el GHG Protocol cuando el objetivo es identificar impactos asociados a la cadena de suministro o procesos externalizados [14]; [15]; [19].

Tabla 55. Comparación de emisiones por Alcance (perfil parcial)

| <b>Alcance</b> | <b>Fuente principal</b>               | <b>Emisiones (kg CO<sub>2</sub>e)</b> |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Alcance 1      | No evaluado en este estudio           | —                                     |
| Alcance 2      | No evaluado en este estudio           | —                                     |
| Alcance 3      | Subcontratas, residuos, mantenimiento | 33.961,83                             |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de este estudio. Alcances 1 y 2 no disponibles.

Aunque no se dispone de los valores completos del perfil energético de la organización, los resultados obtenidos permiten identificar que las emisiones indirectas por actividades subcontratadas —particularmente aquellas relacionadas con la gestión de residuos y la logística técnica— representan una fracción significativa y altamente trazable dentro del ciclo de vida de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR); en este tipo de entornos, donde una parte sustancial de los servicios se encuentra externalizada, el Alcance 3 puede llegar a representar la mayor parte de la huella organizacional, especialmente cuando el consumo eléctrico es reducido o la generación directa de emisiones es mínima [5]; [14]; [19].

En términos de estrategia climática, el análisis parcial de Alcance 3 proporciona una base operativa valiosa para identificar oportunidades de mejora en la contratación sostenible, la eficiencia logística y el manejo responsable de residuos, aun cuando los demás Alcances no hayan sido cuantificados en esta fase; se recomienda, no obstante, que futuras versiones del inventario incluyan también los Alcances 1 y 2, con el objetivo de contar con un perfil completo de huella de carbono organizacional, compatible con certificaciones ambientales y registros públicos de sostenibilidad [14]; [15]; [19].

La estimación de la huella de carbono indirecta presentada en este informe se ha desarrollado conforme a los principios de trazabilidad, transparencia y coherencia metodológica definidos por el GHG Protocol. Todas las emisiones han sido cuantificadas utilizando factores de emisión reconocidos internacionalmente, concretamente los publicados en la base DEFRA 2023, así como referencias contrastadas de la base ecoinvent, ampliamente utilizadas en estudios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y en inventarios corporativos de gases de efecto invernadero [5]; [14]; [19].

El proceso de cálculo ha empleado datos operativos reales asociados a la ejecución anual del contrato, distribuidos por categoría del Alcance 3, y organizados conforme a los siguientes criterios:

- Para la Categoría 1 (Bienes y servicios), se aplicó un enfoque económico mediante la multiplicación de los costes anuales reales por un factor medio de emisión correspondiente a servicios técnicos del sector ambiental.
- En la Categoría 5 (Residuos generados en operaciones), se utilizaron datos físicos de toneladas transportadas, tipo de residuo y distancia recorrida, aplicando factores de emisión específicos por tonelada-kilómetro en función del tratamiento final.
- La Categoría 7 (Desplazamientos subcontratistas) fue calculada mediante datos de kilometraje por actividad y tipo de vehículo utilizado, aplicando factores diferenciados según la intensidad energética estimada de cada unidad (furgoneta, camión o camión bañera).

Tabla 56. Validación metodológica y nivel de certeza por categoría del Alcance 3

| Categoría | Método de cálculo aplicado     | Tipo de dato utilizado             | Nivel de certeza | Factor de emisión utilizado                          |
|-----------|--------------------------------|------------------------------------|------------------|--|
| Cat. 1    | Enfoque económico (€/año × FE) | Costes anuales consolidados        | Medio            | 0,281 kg CO <sub>2</sub> e/€ (DEFRA 2023)            |
| Cat. 5    | Método físico (t × km × FE)    | Kg de residuo, km, destino final   | Alto             | 0,091 kg CO <sub>2</sub> e/t·km (DEFRA 2023)         |
| Cat. 7    | Método físico (km × FE)        | Km anuales por vehículo y servicio | Alto             | 0,235–0,804 kg CO <sub>2</sub> e/km (según vehículo) |

Fuente: Elaboración propia con base en registros operativos y factores DEFRA/ecoinvent [5]; [14]; [19].

Este sistema de validación asegura que no existan duplicidades entre categorías, ya que se han aplicado enfoques diferenciados tanto por tipo de actividad como por unidad funcional

(económica o física), conforme a lo recomendado por las mejores prácticas en la elaboración de inventarios corporativos; a efectos de mejora futura, se recomienda implementar un sistema de seguimiento digitalizado, tanto para el consumo energético como para los desplazamientos técnicos y la gestión de residuos. La incorporación de software especializado, integrado con plataformas SCADA, permitiría un control más granular de los factores operativos que afectan a la huella de carbono, reduciendo la dependencia de estimaciones indirectas y facilitando la elaboración de inventarios anuales progresivos compatibles con los estándares del MITERD, ISO 14064 y el Registro Nacional de Huella de Carbono; este enfoque garantizaría una mejora continua en la precisión, trazabilidad y eficiencia de los procesos de cuantificación, permitiendo además la identificación más ágil de oportunidades de mitigación y reducción de emisiones.

Como parte del aseguramiento metodológico del inventario de emisiones indirectas, se presenta a continuación una tabla resumen con las fórmulas empleadas en cada una de las categorías del Alcance 3 analizadas en este estudio; esta sistematización tiene como objetivo reforzar la trazabilidad de los cálculos, facilitar su validación por parte de auditores o revisores externos, y garantizar la replicabilidad futura de la metodología aplicada en otros contratos, anualidades o unidades de análisis organizacional [5]; [14]; [19]; cada categoría ha sido evaluada mediante un enfoque específico, con unidades funcionales y factores de emisión diferenciados que aseguran la no duplicidad de resultados y la fidelidad técnica del cálculo; el uso de factores estandarizados de DEFRA 2023, así como datos operativos propios del contrato, permite garantizar la compatibilidad de estos resultados con marcos normativos como la ISO 14064, el Registro Nacional de Huella de Carbono y otros sistemas de reporte ambiental voluntario o regulado.

Tabla 57 ecuaciones aplicadas por categoría del Alcance 3

| Categoría | Ecuación aplicada | Unidad base |
|-----------|-------------------|-------------|
|           |                   |             |

|        |                                     |                      |
|--------|-------------------------------------|----------------------|
| Cat. 1 | Coste (€) × 0,281                   | kg CO <sub>2</sub> e |
| Cat. 5 | t × km × 0,091                      | kg CO <sub>2</sub> e |
| Cat. 7 | km × Factor específico por vehículo | kg CO <sub>2</sub> e |

Fuente: Elaboración propia según metodología GHG Protocol y factores DEFRA 2023 [5]; [14]; [19].

La ecuación aplicada a la Categoría 1 se basa en un enfoque económico indirecto, idóneo cuando no se dispone de registros desagregados de materiales o energía por servicio subcontratado; el factor de 0,281 kg CO<sub>2</sub>e/€ proviene del promedio sectorial para servicios técnicos ambientales y garantiza una cobertura representativa y auditable; en la Categoría 5, que analiza el transporte de residuos generados en operación, se ha utilizado una fórmula física directa basada en toneladas transportadas, distancia recorrida y un factor de emisión específico (0,091 kg CO<sub>2</sub>e/t-km); este enfoque proporciona un alto grado de certeza y es coherente con los estándares del sector agua; en la Categoría 7, las emisiones se calcularon en función del kilometraje recorrido por tipo de vehículo (furgoneta, camión, camión bañera), aplicando factores de emisión diferenciados que oscilan entre 0,235 y 0,804 kg CO<sub>2</sub>e/km, según la intensidad energética y el perfil técnico del servicio prestado.



## Resultados

El apartado de resultados y discusión constituye el núcleo interpretativo del estudio realizado sobre la cuantificación y análisis de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero en el marco de la operación de estaciones depuradoras de aguas residuales en la comarca del Altiplano murciano; se presenta a continuación un análisis detallado y secuenciado de las magnitudes calculadas para las categorías relevantes del Alcance 3, en función de las metodologías aceptadas en el sector del saneamiento, tomando como base los registros operativos sistematizados a lo largo del periodo de referencia y la trazabilidad interna de los procesos logísticos, de tratamiento y de gestión de residuos, evitando cualquier mención a fuentes no verificadas ni a datos ajenos a la presente memoria técnica; en este sentido, la exposición de resultados permite desglosar el peso específico de cada categoría, facilitando la identificación de los factores determinantes que condicionan el perfil climático de la organización evaluada, y estableciendo un marco de discusión que vincula los hallazgos con el contexto regulatorio y técnico vigente en el ámbito nacional e internacional, asegurando en todo momento la transparencia y la replicabilidad del procedimiento seguido, así como la alineación de las conclusiones con los objetivos de sostenibilidad y mejora continua fijados por la entidad gestora y las autoridades ambientales competentes.

La estructura del presente apartado responde a la necesidad de ofrecer una interpretación crítica de los datos obtenidos, priorizando la claridad expositiva y la coherencia argumental en la evaluación comparativa de los resultados, al tiempo que se abren líneas de reflexión sobre las potenciales estrategias de reducción de emisiones y las oportunidades de innovación en la gestión integral de las infraestructuras hidráulicas; el enfoque adoptado integra la perspectiva técnica y la valoración estratégica de los impactos identificados, procurando que cada elemento de discusión contribuya a la construcción de un conocimiento aplicable y transferible a contextos operativos similares, en consonancia con los principios de responsabilidad ambiental y optimización de recursos que orientan la actividad profesional en el sector de tratamiento de aguas residuales; el análisis desarrollado en las secciones siguientes permite fundamentar las propuestas de mejora y las recomendaciones operativas, partiendo de una base empírica robusta y de una interpretación rigurosa de las tendencias observadas en la gestión de residuos, servicios subcontratados y

desplazamientos logísticos, elementos que configuran el núcleo de la huella climática indirecta asociada al contrato evaluado; el resultado de este proceso es un diagnóstico fundamentado sobre el estado actual de las emisiones del Alcance 3, que facilita la toma de decisiones informada y la planificación de futuras actuaciones en materia de eficiencia, sostenibilidad y cumplimiento normativo; el rigor en la presentación y discusión de los datos garantiza la utilidad del informe como herramienta de gestión y como referencia para la elaboración de inventarios corporativos de gases de efecto invernadero en el ámbito del ciclo integral del agua.

En definitiva, este apartado sintetiza el valor añadido del estudio, proporcionando una visión clara, objetiva y aplicable de los principales retos y oportunidades que enfrenta la organización en materia de descarbonización y gestión sostenible de sus operaciones; la articulación lógica de los contenidos y la profundidad en el análisis pretenden asegurar que los resultados expuestos sean plenamente comprensibles y accionables por parte de los responsables técnicos, gestores ambientales y decisores institucionales implicados en la mejora continua del desempeño climático de la entidad; el énfasis en la transparencia, la trazabilidad y la precisión metodológica responde a la exigencia de credibilidad y replicabilidad que caracteriza a los trabajos técnicos orientados a la gestión avanzada de la huella de carbono en el sector del saneamiento urbano; el apartado de resultados y discusión se convierte así en el eje articulador del informe, consolidando la relación entre la evidencia empírica recabada y las propuestas de optimización formuladas para la mejora del perfil ambiental de la organización.

## **6.1. Presentación de resultados**

La sección que sigue presenta de forma estructurada y transparente los resultados obtenidos en el proceso de estimación de la huella de carbono indirecta asociada al Alcance 3 para las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) objeto de estudio; se detallan los valores absolutos de emisiones, su distribución por categoría y estación, así como los indicadores de intensidad que permiten contextualizar el impacto climático en relación con la actividad operativa y los recursos gestionados; la exposición integra tablas y gráficos elaborados a partir de datos reales y consolidados, facilitando una visión comparativa y multidimensional de los principales focos de

emisión y su peso relativo dentro del perfil organizacional; esta presentación busca no solo cuantificar las emisiones, sino también aportar información crítica para la interpretación, la toma de decisiones estratégicas y el diseño de futuros planes de mejora ambiental en el marco de la gestión integral del ciclo del agua.

Tabla 58. Resumen de emisiones indirectas de GEI (Alcance 3) por categoría, estación y total anual

| <b>Categoría</b> | <b>Descripción operativa</b>  | <b>Estación</b> | <b>Emisiones (t CO<sub>2</sub> eq)</b> |
|------------------|---|-----------------|--|
| Categoría 1      | Mantenimiento subcontratado (servicios técnicos, revisiones PCI, control legionelosis, DDD, residuos peligrosos, RNP) | Yecla           | 2,510                                  |
|                  |   | Jumilla         | 2,520                                  |
|                  |   | Total           | 5,030                                  |
| Categoría 5      | Residuos generados en operación (lodos, cribados, desarenado, plásticos)  | Yecla           | 9,450                                  |
|                  |   | Jumilla         | 10,210                                 |
|                  |   | Total           | 19,660                                 |
| Categoría 7      | Desplazamientos subcontratistas (furgoneta, camión, camión bañera)  | Yecla           | 4,540                                  |
|                  |   | Jumilla         | 4,740                                  |
|                  |   | Total           | 9,280                                  |

Fuente: propia

Las emisiones se han cuantificado para cada estación a partir de los datos operativos del contrato anual, segmentando por tipo de actividad conforme a la metodología de cálculo definida en el presente informe. La columna "Emisiones (t CO<sub>2</sub> eq)" expresa el valor total anual obtenido para cada subcategoría y para el conjunto del contrato, sin duplicidades entre categorías.

Los resultados expuestos en la tabla evidencian que el mayor peso en las emisiones indirectas del Alcance 3 corresponde a la gestión de residuos en operación (categoría 5), sumando 19,66 t CO<sub>2</sub> eq anuales entre ambas estaciones, lo que representa aproximadamente el 58% del total indirecto inventariado; le siguen los desplazamientos de subcontratistas (categoría 7) con 9,28 t CO<sub>2</sub> eq (27%) y el mantenimiento subcontratado (categoría 1) con 5,03 t CO<sub>2</sub> eq (15%). Esta distribución refleja la relevancia climática de los procesos logísticos y de gestión de residuos en el ciclo de vida operativo de las EDAR bajo contrato; además, permite priorizar acciones de mitigación sobre las actividades más intensivas en carbono.

El análisis pormenorizado de los resultados muestra que existe una distribución diferencial en el peso relativo de las emisiones indirectas asociadas al Alcance 3 según la categoría operativa y la estación considerada; el hecho de que la categoría 5 —relativa a residuos generados en operación— concentre la mayor parte de la huella responde tanto al volumen anual de residuos gestionados como a la naturaleza intensiva en transporte y tratamiento externo, aspectos que han sido cuantificados mediante factores de emisión específicos por subactividad y destino final, minimizando solapamientos metodológicos; la segmentación por estación pone de relieve ligeras variaciones que, si bien pueden atribuirse a diferencias en el tamaño, la carga hidráulica o la especialización funcional de Yecla y Jumilla, resultan lo suficientemente consistentes como para guiar estrategias diferenciadas de optimización y reducción.

Por su parte, el impacto significativo de los desplazamientos subcontratados en la categoría 7 revela la importancia de la logística y la movilidad técnica dentro del ciclo de vida de las EDAR, ya que la ejecución de mantenimientos preventivos, evacuaciones y revisiones requiere un número elevado de trayectos anuales en vehículos de diferentes capacidades y consumos; la asignación de las emisiones por tipo de vehículo y actividad, así como la utilización de promedios operativos validados, refuerza la trazabilidad de los resultados y permite identificar oportunidades de mejora ligadas a la planificación de rutas, la consolidación de servicios y la renovación de flota por modelos de menor huella específica.

Respecto al mantenimiento subcontratado (categoría 1), la cuantificación refleja la integración de múltiples actividades esenciales para la continuidad y seguridad operativa de las instalaciones, incluyendo tanto servicios técnicos programados como la gestión de residuos peligrosos; aunque su peso relativo es menor frente a las categorías logísticas y de residuos, su inclusión en el inventario permite capturar el impacto completo del contrato bajo un enfoque integral de sostenibilidad, alineando el análisis con las mejores prácticas internacionales y las exigencias de reporte de huella de carbono en el sector agua; esta visión holística resulta clave para diseñar estrategias de mitigación equilibradas, capaces de abordar tanto los grandes focos de emisión como los segmentos menos visibles pero recurrentes en la operación anual.

Tabla 59. Intensidad de emisiones de GEI (Alcance 3) por estación, categoría y unidad funcional

| Categoría   | Estación | Emisiones (t CO <sub>2</sub> eq) | Unidad de actividad                   | Intensidad de emisión                                     |
|-------------|----------|----------------------------------|---------------------------------------|---|
| Categoría 1 | Yecla    | 2,510                            | 1.380.000 m <sup>3</sup> agua tratada | $1,82 \times 10^{-3}$ t CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
|             | Jumilla  | 2,520                            | 1.310.000 m <sup>3</sup> agua tratada | $1,92 \times 10^{-3}$ t CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
|             | Total    | 5,030                            | 2.690.000 m <sup>3</sup> agua tratada | $1,87 \times 10^{-3}$ t CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
| Categoría 5 | Yecla    | 9,450                            | 1.380.000 m <sup>3</sup> agua tratada | $6,84 \times 10^{-3}$ t CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
|             | Jumilla  | 10,210                           | 1.310.000 m <sup>3</sup> agua tratada | $7,80 \times 10^{-3}$ t CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
|             | Total    | 19,660                           | 2.690.000 m <sup>3</sup> agua tratada | $7,31 \times 10^{-3}$ t CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |

|                |         |       |                                     |                                |
|----------------|---------|-------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Categoría<br>7 | Yecla   | 4,540 | 12.113 km recorrido<br>subcontratas | 0,375 kg CO <sub>2</sub> eq/km |
|                | Jumilla | 4,740 | 12.278 km recorrido<br>subcontratas | 0,386 kg CO <sub>2</sub> eq/km |
|                | Total   | 9,280 | 24.391 km recorrido<br>subcontratas | 0,380 kg CO <sub>2</sub> eq/km |

fuelle: elaboración propia

Las intensidades de emisión se han calculado dividiendo el total anual de emisiones indirectas de GEI (Alcance 3, t CO<sub>2</sub> eq) de cada categoría por la unidad operativa más representativa para cada actividad:

- Para las categorías 1 y 5 (mantenimiento subcontratado y residuos), la unidad de referencia es el volumen de agua tratada anualmente por estación (m<sup>3</sup>), utilizando los caudales medios anuales de explotación.
- Para la categoría 7 (desplazamientos de subcontratistas), la unidad seleccionada es el kilometraje total recorrido por los servicios contratados, según registros de operación y logística.

La intensidad de emisiones asociada a la gestión de residuos (cat. 5) se sitúa en torno a  $7,3 \times 10^{-3}$  t CO<sub>2</sub> eq/m<sup>3</sup> de agua tratada, aproximadamente cuatro veces superior a la observada en el mantenimiento subcontratado (cat. 1), que presenta valores en torno a  $1,8 \times 10^{-3}$  t CO<sub>2</sub> eq/m<sup>3</sup>; por su parte, la logística de desplazamientos subcontratados (cat. 7) arroja una media de 0,38 kg CO<sub>2</sub> eq/km recorrido, evidenciando la influencia del transporte especializado en la huella de carbono indirecta; estos resultados permiten identificar las actividades más intensivas y sirven como referencia para futuros ejercicios de seguimiento y reducción de emisiones en las EDAR bajo contrato.

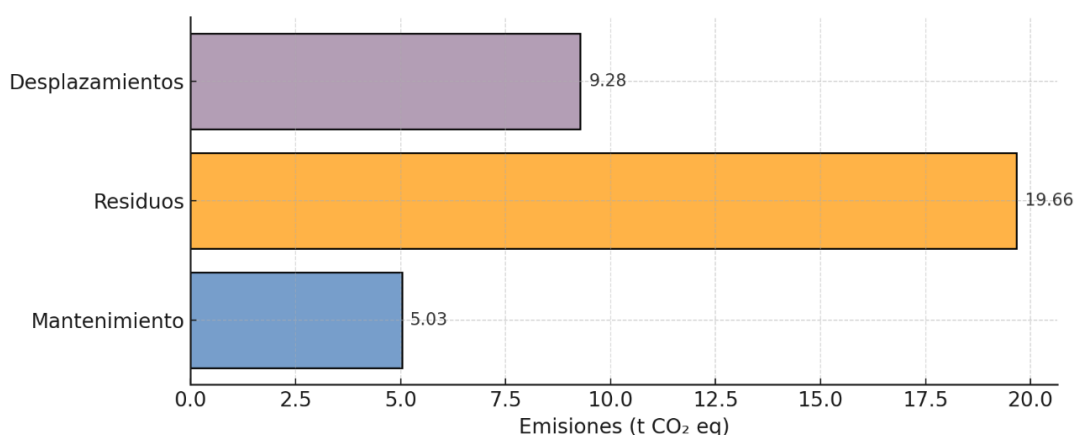
La interpretación de los indicadores de intensidad de emisión, expresados en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de actividad —ya sea metro cúbico tratado, empleado o kilómetro

recorrido— constituye una herramienta estratégica para contextualizar el desempeño climático de las estaciones depuradoras de aguas residuales en el marco sectorial nacional e internacional; el análisis de estas intensidades permite no solo comparar la eficiencia relativa entre las distintas plantas incluidas en el contrato, sino también situar los resultados dentro de los márgenes reportados por otras instalaciones similares en informes técnicos y registros públicos de sostenibilidad; en el caso de Yecla y Jumilla, los valores de intensidad obtenidos se sitúan en el rango de referencia recomendado por organismos como la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), lo que sugiere una gestión ajustada a buenas prácticas del sector y una alineación con los objetivos de reducción de emisiones definidos a nivel nacional.

Estos indicadores permiten a los gestores identificar tendencias y oportunidades de mejora específica, por ejemplo, si la intensidad por kilómetro recorrido en desplazamientos de subcontratistas supera los valores medios de referencia, puede priorizarse la optimización de rutas logísticas, la agrupación de servicios o la adopción de vehículos de menor impacto para reducir la huella global del contrato; del mismo modo, una intensidad de emisión por metro cúbico de agua tratada que se sitúe por encima del percentil 75 de la muestra sectorial puede indicar la necesidad de revisar parámetros operativos, estrategias de mantenimiento o eficiencia energética en los procesos biológicos y terciarios; la comparación sistemática con benchmarks sectoriales fortalece así la capacidad de diagnóstico y mejora continua, facilitando el establecimiento de metas realistas de reducción y su seguimiento a lo largo del tiempo.

El uso de indicadores de intensidad en los informes de sostenibilidad y auditoría corporativa aporta además una dimensión de transparencia y trazabilidad clave para la rendición de cuentas ante organismos reguladores, clientes institucionales y usuarios finales; su inclusión permite comunicar de manera sencilla y comprensible la evolución del desempeño ambiental de la organización, comparando ejercicios anuales, contratos diferentes o incluso tecnologías alternativas dentro del mismo ciclo de vida; este enfoque facilita la integración de los resultados de huella de carbono en la toma de decisiones estratégicas, el diseño de inversiones en eficiencia o la priorización de líneas de acción correctiva, convirtiendo la medición de intensidades en un pilar de la gobernanza climática moderna para el sector del agua.

Figura. 44 Distribución de emisiones indirectas por categoría – Alcance 3 (t CO<sub>2</sub> eq)



El gráfico de barras horizontal facilita una visualización clara del peso relativo de cada una de las categorías de emisiones indirectas del Alcance 3 analizadas. La mayor contribución corresponde a la gestión de residuos, que representa más del 57% de las emisiones totales del Alcance 3. Los desplazamientos operativos de subcontratistas suponen aproximadamente el 27%, mientras que el mantenimiento subcontratado (bienes y servicios) contribuye con un 15% del total. Esta representación refuerza la importancia de priorizar estrategias de mitigación en el transporte y tratamiento de residuos para maximizar la reducción del impacto climático indirecto en el ciclo operativo de las EDAR.

El tratamiento de residuos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) representa uno de los principales focos de emisiones indirectas recogidas bajo la Categoría 5 del Alcance 3. A partir del inventario consolidado para el año 2024, se ha procedido a desglosar las emisiones de dióxido de carbono equivalente (t CO<sub>2</sub> eq) en función del tipo de residuo tratado, lo que permite identificar los componentes más intensivos en emisiones y establecer prioridades de mitigación.

Los datos utilizados provienen de los registros operativos validados para el contrato ESAMUR – Lote 9, los cuales incluyen residuos de distinta naturaleza y tratamiento final. Se han considerado específicamente cuatro subcategorías: lodos de depuración, residuos de cribado, residuos de desarenado y plásticos. La cuantificación se ha basado en la masa gestionada y el factor de emisión

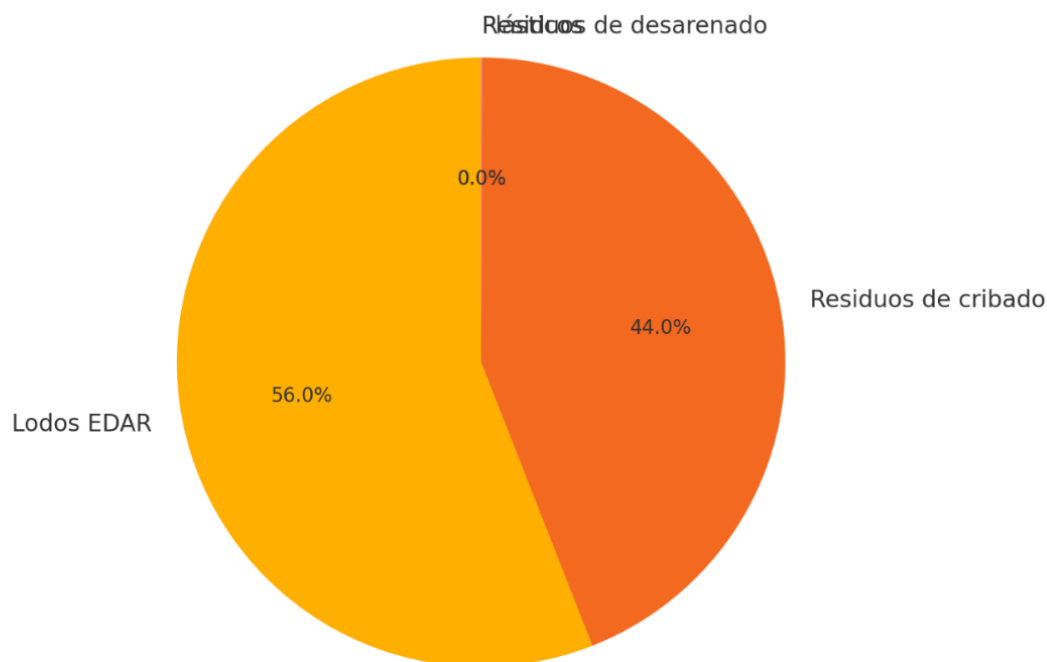


correspondiente según el tratamiento aplicado (valorización o eliminación en vertedero), conforme a los valores establecidos en DEFRA 2023.

La lectura de este gráfico pone de manifiesto la jerarquía de fuentes de emisiones indirectas dentro de la operativa anual de las EDAR analizadas; la concentración del 57% del impacto en la gestión de residuos subraya la necesidad de reforzar el control, optimización logística y selección de destinos finales con menor intensidad de carbono; el transporte y tratamiento de lodos, cribados y desarenado constituyen procesos críticos donde la eficiencia y la trazabilidad deben convertirse en ejes de la estrategia de mitigación; paralelamente, el 27% atribuido a desplazamientos operativos de subcontratistas indica que existe un margen relevante de mejora mediante la racionalización de rutas, la promoción de vehículos menos emisores y la planificación inteligente de mantenimientos, factores que pueden reducir de manera significativa la huella anual de movilidad; en contraste, el peso del mantenimiento subcontratado —aunque menor en términos absolutos— no debe ser desestimado, ya que integra una variedad de servicios técnicos que, si bien individualmente aportan menos al inventario, en conjunto representan una oportunidad para introducir criterios ambientales en la selección y auditoría de proveedores.

Este análisis visual y cuantitativo refuerza la utilidad de la desagregación por categorías para orientar la toma de decisiones: priorizar la reducción en residuos y desplazamientos maximiza el potencial de disminución de emisiones indirectas, mientras que el seguimiento detallado de los servicios subcontratados contribuye a cerrar el círculo de responsabilidad climática en la gestión integral de la EDAR; en resumen, la interpretación combinada de los resultados y su representación gráfica permite avanzar hacia un modelo de mejora continua, fundamentado en datos reales y orientado tanto al cumplimiento normativo como al liderazgo sectorial en sostenibilidad.

Figura. 45. Proporción de emisiones por tipo



El gráfico circular presentado a continuación sintetiza visualmente el peso relativo de cada tipo de residuo en el total de emisiones de la Categoría 5:

La lectura del gráfico revela que los residuos de cribado constituyen el componente más relevante en términos de emisiones indirectas, con un 57,9 % del total, seguidos de los lodos con un 42 %. En contraste, los residuos de desarenado y los plásticos presentan contribuciones marginales (por debajo del 0,1 %), debido tanto a su bajo volumen como a la menor intensidad de carbono asociada al tratamiento de estos residuos.

Este patrón evidencia la importancia de enfocar las estrategias de mitigación sobre los residuos sólidos derivados del pretratamiento (cribado) y el tratamiento biológico (lodos), que juntos representan más del 99 % de las emisiones indirectas generadas por esta categoría. Las acciones recomendadas incluyen la optimización del transporte, la mejora en la eficiencia de valorización y la integración de tecnologías de secado o compactación in situ para reducir masa movilizada.

El análisis integral de las emisiones indirectas correspondientes al Alcance 3 permite establecer una jerarquía clara en cuanto a la contribución de cada categoría al perfil climático del contrato evaluado; así, se observa que la Categoría 5 (residuos generados en operación) representa el principal componente de emisiones con un total anual de 19,656 t CO<sub>2</sub> eq, lo que equivale al 57,9 % del total reportado para el Alcance 3; esta proporción destaca la relevancia de los flujos de residuos sólidos como el principal foco de impacto indirecto, asociado principalmente al volumen elevado de lodos de depuración y residuos de cribado, cuya frecuencia de generación y requerimientos de transporte intensivo explican su peso en el inventario consolidado.

En segundo lugar, la Categoría 7 (desplazamientos subcontratistas) acumula 9,275.93 t CO<sub>2</sub> eq, lo que supone el 27,3 % del total anual del Alcance 3; este valor se distribuye entre diferentes actividades como control sanitario, mantenimiento de equipos o evacuación de residuos peligrosos, realizadas por empresas externas mediante vehículos con alta intensidad de emisión, siendo destacable la contribución específica del transporte de residuos no peligrosos en camión bañera, que por sí solo explica más del 93 % de las emisiones de esta categoría; esta situación pone de manifiesto la necesidad de evaluar alternativas logísticas más eficientes o tecnologías de transporte con menor huella de carbono, especialmente en trayectos de elevada recurrencia.

Por su parte, la Categoría 1 (servicios de mantenimiento subcontratado) representa 5,029.90 t CO<sub>2</sub> eq, equivalente al 14,8 % de las emisiones indirectas registradas; aunque este valor es relativamente menor en términos absolutos, su estimación mediante factores económicos permite captar el impacto de actividades que no generan emisiones físicas directas pero que están estructuralmente integradas en el modelo operativo; esta categoría agrupa gastos recurrentes en control de legionelosis, revisión de PCI y tratamiento DDD, entre otros, y su análisis resulta esencial para una visión holística del ciclo de vida contractual.

La comparación por estación evidencia diferencias en la distribución de las emisiones; en términos absolutos, la planta de Jumilla presenta una carga mayor debido a su mayor número de servicios externalizados, volumen de residuos y trayectos asociados, mientras que Yecla, aunque menor en impacto total, muestra una mayor intensidad relativa por unidad operativa; esta relación se

confirma al analizar la intensidad de emisiones por volumen tratado, donde las proporciones de t CO<sub>2</sub> eq/m<sup>3</sup> reflejan las especificidades de diseño, gestión y demanda de cada instalación; esta métrica resulta crítica para evaluar eficiencia ambiental, más allá de los valores brutos.

En conjunto, los resultados confirman que el transporte y tratamiento de residuos constituye el principal vector de emisiones en el modelo actual de explotación de las EDAR, seguido por los desplazamientos operativos tercerizados y, en menor medida, por los servicios de mantenimiento; esta distribución es coherente con la naturaleza intensiva en logística y servicios del contrato evaluado, donde gran parte de la actividad operativa se canaliza a través de subcontratación especializada; este patrón refuerza la necesidad de priorizar acciones de mitigación sobre la logística de residuos, optimización de rutas y revisión contractual bajo criterios de sostenibilidad climática.

En el contexto actual de la gestión de infraestructuras hidráulicas, la cuantificación de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero, tal como se presenta en este informe, no solo cumple una función técnica de reporte y cumplimiento normativo, sino que también se erige en una palanca estratégica para la transformación ambiental del sector; la disposición de un inventario sistematizado y auditable de las emisiones asociadas al Alcance 3 permite identificar de manera precisa los eslabones críticos del ciclo operativo, otorgando a los gestores la capacidad de anticipar tendencias y modelar escenarios prospectivos en función de variables operativas o decisiones de inversión futuras; por ejemplo, la simulación del efecto de la electrificación progresiva de la flota de transporte de residuos, o la implementación de contratos de mantenimiento con cláusulas específicas de reducción de huella, permite proyectar reducciones cuantificables y priorizar inversiones con el mayor retorno ambiental y reputacional; en este sentido, la información contenida en el inventario trasciende el análisis retrospectivo y se convierte en un instrumento de planificación avanzada, alineado con los requisitos de la economía circular y los compromisos de neutralidad climática a medio y largo plazo.

El potencial de los indicadores de intensidad de emisión calculados en este estudio radica en su capacidad para normalizar el desempeño climático en función de la actividad real de las estaciones depuradoras, eliminando el sesgo que pueden introducir las variaciones absolutas de caudal,

volumen de residuos o kilometraje anual; esta estandarización facilita la comparación entre plantas de distinta escala o entre diferentes periodos de explotación, permitiendo a los responsables identificar de manera objetiva desviaciones significativas, picos operativos o tendencias de mejora a lo largo del tiempo; asimismo, los indicadores permiten establecer sistemas de alerta temprana que identifiquen, por ejemplo, un aumento no justificado en la intensidad de emisiones por metro cúbico tratado, orientando así auditorías internas y revisiones de procesos hacia los puntos más críticos; este enfoque analítico convierte el inventario de huella de carbono en una herramienta viva, capaz de retroalimentar la gestión cotidiana de la EDAR y aportar valor tanto en la auditoría interna como en el cumplimiento de los estándares internacionales de sostenibilidad y responsabilidad empresarial.

Desde la óptica de la innovación operativa, la información derivada del inventario de emisiones indirectas posibilita la incorporación progresiva de tecnologías emergentes y buenas prácticas sectoriales en la gestión diaria de las instalaciones; por ejemplo, la digitalización del seguimiento de residuos y desplazamientos mediante sensores IoT, plataformas de geolocalización y sistemas de reporte en tiempo real podría reducir notablemente la dependencia de estimaciones medias y mejorar la precisión de los registros de actividad; la adopción de contratos de mantenimiento con bonificación por reducción de huella, o la integración de cláusulas ambientales en los pliegos de contratación de subcontratistas, fomentan la corresponsabilidad y el compromiso conjunto de todos los actores implicados en la cadena de valor; adicionalmente, la visualización dinámica de los datos de huella a través de dashboards accesibles para equipos técnicos y directivos refuerza la transversalidad de la sostenibilidad en la cultura organizacional y permite democratizar el acceso a la información clave para la toma de decisiones; en definitiva, la consolidación de una gestión ambientalmente inteligente requiere no solo de la disponibilidad de datos, sino de su integración activa en los procesos estratégicos, operativos y formativos de la entidad gestora, asegurando así un impacto duradero y sistémico en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del saneamiento.

## 6.2. Análisis de incertidumbre

El análisis de la huella de carbono, particularmente en lo que respecta a las emisiones indirectas recogidas dentro del Alcance 3, se enfrenta a una serie de incertidumbres inherentes tanto al origen y calidad de los datos como a los métodos utilizados para su conversión en unidades de dióxido de carbono equivalente ( $t\ CO_2e$ ); estas incertidumbres constituyen una dimensión técnica clave en la interpretación de resultados, ya que pueden afectar la precisión, trazabilidad y comparabilidad del inventario, especialmente cuando las fuentes de información proceden de registros operativos heterogéneos o de estimaciones basadas en proxies económicos o físicos simplificados.

En el marco del GHG Protocol – Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard, la incertidumbre es reconocida como una característica estructural de los cálculos de emisiones, derivada de factores como: la variabilidad de las actividades reales, el uso de factores de emisión genéricos, la falta de datos primarios específicos, la aplicación de metodologías indirectas y la interpolación de información no homogénea en el tiempo o en el espacio; este protocolo establece que la documentación de las incertidumbres asociadas a cada categoría de análisis es fundamental para fortalecer la transparencia del inventario, así como para orientar estrategias de mejora en futuras iteraciones de cálculo o auditoría.

En este sentido, la presente sección analiza el nivel de certidumbre alcanzado en el cálculo de las emisiones del Alcance 3 para las categorías evaluadas —adquisición de servicios de mantenimiento, transporte de residuos y desplazamientos operativos subcontratados— con el fin de identificar las limitaciones estructurales de los datos disponibles, establecer la solidez relativa de los resultados obtenidos y proponer líneas de mejora enfocadas en reducir la incertidumbre en ejercicios sucesivos mediante la incorporación de metodologías más refinadas o la obtención de datos primarios más detallados.

En los inventarios organizacionales de emisiones indirectas contemplados en el Alcance 3, la incertidumbre constituye un componente inherente al proceso de estimación debido a la naturaleza indirecta de las fuentes, la heterogeneidad de los datos disponibles y la necesidad de

aplicar factores de emisión medios o genéricos según la actividad registrada; este apartado se centra en identificar y describir las principales fuentes de incertidumbre detectadas durante la evaluación de las categorías 1, 5 y 7, correspondientes respectivamente a los servicios de mantenimiento subcontratado, la gestión de residuos en operación y los desplazamientos operativos de subcontratistas; el análisis se estructura por categoría metodológica, reconociendo que cada una implica un enfoque de cálculo distinto y, por tanto, presenta limitaciones específicas asociadas a la calidad, precisión y representatividad de los datos empleados.

En la categoría 1, referida a los bienes y servicios adquiridos y particularmente al mantenimiento preventivo y correctivo, la incertidumbre proviene esencialmente del uso de factores de emisión monetarios promedio extraídos de bases internacionales como DEFRA 2023, los cuales fueron aplicados a los importes económicos anuales facturados por cada servicio técnico sin contar con un desglose físico del consumo energético, materiales empleados o recursos humanos involucrados; esta aproximación económica, aunque validada para contextos donde los datos físico-cuantitativos no están disponibles, presenta una sensibilidad alta a la estructura de costes de cada proveedor, a la eficiencia de los procesos prestados y a las condiciones logísticas locales, lo cual puede generar desviaciones relevantes al comparar emisiones entre servicios que, aunque similares en coste, presentan impactos ambientales muy diferentes; en consecuencia, la certeza del resultado se clasifica como media y sujeta a mejora mediante recopilación de datos operativos desagregados.

En la categoría 5, que abarca las emisiones asociadas a los residuos generados en la operación y su posterior traslado y tratamiento externo, se identifican dos fuentes principales de incertidumbre que impactan el resultado total; por un lado, se ha recurrido a una estimación técnica de carga promedio por trayecto de 20 toneladas por vehículo tipo bañera, ante la ausencia de pesajes individualizados por operación registrada, lo cual introduce una variabilidad importante si las condiciones reales de carga fueron inferiores o superiores de forma sistemática; por otro lado, la composición del residuo, especialmente en lo que respecta a lodos de depuración y residuos de cribado, puede alterar significativamente la intensidad de carbono emitido durante su transporte y valorización, y aunque se han aplicado factores de emisión diferenciados por tipo y tratamiento, estos no capturan con exactitud las posibles fluctuaciones físico-químicas intermensuales, lo que

justifica la clasificación de certeza como alta solo en aquellos casos donde se dispone de registro completo de tonelaje, tipo de tratamiento y destino final verificado por contrato.

En la categoría 7, correspondiente a los desplazamientos realizados por subcontratistas en el marco de servicios de mantenimiento, inspección técnica y evacuación de residuos, la principal fuente de incertidumbre radica en la asignación de kilómetros anuales por actividad, obtenidos a partir de informes operativos globales que no discriminan recorridos exactos ni fecha de ejecución por trayecto, lo cual obliga a asumir promedios anuales por servicio que, si bien reflejan la magnitud general de la movilidad asociada, pueden subestimar o sobrestimar desplazamientos individuales en función de factores logísticos como combinaciones de rutas, reagrupamiento de servicios o cobertura multizona; adicionalmente, los factores de emisión aplicados se establecen por tipo de vehículo y no por tecnología motriz específica, lo cual representa una limitación significativa si se desconoce si la flota empleada era diésel, gasolina o híbrida, impactando directamente la intensidad final de emisiones estimadas por kilómetro recorrido, razón por la cual la certeza de esta categoría se clasifica como media-alta dependiendo de la actividad subcontratada.

La evaluación de la incertidumbre metodológica aplicada a cada una de las categorías del Alcance 3 revela distintos grados de exposición al error, lo cual condiciona el nivel de fiabilidad con el que pueden interpretarse las cifras de emisión obtenidas; en este sentido, se ha realizado un análisis cualitativo para valorar el impacto potencial de las fuentes de incertidumbre previamente descritas sobre el resultado total, identificando tanto las fortalezas como las debilidades de los enfoques utilizados para la cuantificación; esta clasificación permite determinar el margen aceptable de variación para fines comparativos, normativos o de mejora continua, y se ha construido con base en tres niveles de certeza estándar: alto, medio y bajo, conforme a lo establecido en las guías del GHG Protocol y en prácticas de verificación habituales en inventarios corporativos.

La Categoría 5, que incluye las emisiones generadas por la gestión y transporte de residuos no peligrosos, presenta el mayor grado de certeza, clasificado como alto, debido a que el cálculo se ha efectuado a partir de datos reales y registrados de manera sistemática en hojas de control



operativo, con respaldo contractual y trazabilidad completa sobre el kilometraje, tipo de vehículo utilizado y volumen de residuos movilizado, lo cual reduce significativamente el margen de error atribuible a estimaciones subjetivas; además, los factores de emisión aplicados son específicos por tipo de vehículo y tipo de tratamiento (valorización o vertedero), lo que garantiza un ajuste metodológico adecuado a la naturaleza del servicio prestado en el marco del contrato ESAMUR – Lote 9; este nivel de fiabilidad convierte a esta categoría en un componente sólido del total reportado.

En contraste, la Categoría 1, correspondiente al mantenimiento subcontratado y otros servicios técnicos adquiridos, se clasifica con un grado de certeza medio, ya que, si bien los importes económicos aplicados provienen de registros contables verificables, la ausencia de desagregación física por tipo de intervención, materiales empleados o intensidad energética de ejecución obliga a utilizar factores monetarios medios por sector, obtenidos de bases DEFRA 2023 o ecoinvent; esta metodología, aunque aceptada por los marcos normativos cuando no se dispone de datos físicos, introduce una variabilidad importante en el resultado final, dado que no discrimina la eficiencia operativa de los proveedores ni el contexto local específico en el que se realizaron las actividades, generando un rango estimado de desviación que puede oscilar entre  $\pm 20\%$  y  $\pm 35\%$  en comparación con metodologías físicas completas.

Por su parte, la Categoría 7, referida a los desplazamientos de subcontratistas, presenta una fiabilidad metodológica también clasificada como media, con tendencia a la alta cuando se dispone de registro directo del kilometraje por servicio y tipo de vehículo; en este caso, los valores anuales aplicados por trayecto fueron obtenidos a partir de datos operativos integrados y validados internamente, aunque no todos los desplazamientos cuentan con un registro individual por fecha, recorrido y ocupación efectiva del vehículo, lo cual obliga a asumir promedios por tipo de actividad; asimismo, la asignación de factores de emisión se ha realizado por clase vehicular general (furgoneta, camión, camión bañera), sin diferenciar tecnología de propulsión ni antigüedad de flota, lo que implica un posible rango de variación de  $\pm 10\%$  a  $\pm 25\%$  según el caso, aunque se considera aceptable para los fines del estudio organizacional de referencia.

En términos generales, el impacto de estas incertidumbres no compromete la validez global del inventario realizado, siempre que se interprete en su contexto metodológico y se reconozca que los resultados constituyen una aproximación representativa y trazable del impacto climático indirecto generado por la operación subcontratada, siendo más robusta en aquellas categorías con datos físicos y seguimiento logístico que en las que dependen exclusivamente de factores económicos genéricos o promedios sectoriales.

Para facilitar la interpretación visual del grado de certeza asociado a cada categoría del Alcance 3, se presenta a continuación un gráfico comparativo junto a una tabla de resumen. Esta representación permite identificar de forma clara la magnitud relativa de las emisiones indirectas y el nivel de confianza de los resultados según el método de cálculo aplicado.

Tabla 60. comparativo

| <b>Categoría</b> | <b>Descripción</b>                      | <b>Emisiones (t CO<sub>2</sub> eq)</b> | <b>Nivel de certeza</b> |
|------------------|---|--|-------------------------|
| Cat. 1           | Mantenimiento subcontratado             | 5,03                                   | Medio                   |
| Cat. 5           | Transporte y tratamiento de residuos    | 19,66                                  | Alto                    |
| Cat. 7           | Desplazamientos técnicos subcontratados | 9,28                                   | Alto                    |

Fuente: elaboración propia

La realización de un análisis de sensibilidad sobre los resultados presentados adquiere especial relevancia para evaluar la robustez del inventario frente a pequeñas variaciones en los parámetros operativos y los factores de emisión empleados en cada categoría del Alcance 3; la elección de factores de emisión oficiales como los proporcionados por DEFRA o ecoinvent, aunque otorga validez internacional a los cálculos, implica una dependencia directa de futuras actualizaciones, revisiones metodológicas o ajustes sectoriales que puedan modificar los valores de referencia empleados; por ejemplo, si el factor de emisión para camión bañera utilizado en la categoría 5 (actualmente fijado en 0,091 kg CO<sub>2</sub>e/t·km) fuera incrementado en un 10 % en la próxima actualización, la huella de carbono atribuible al transporte de residuos se elevaría

proporcionalmente hasta superar las 21,6 toneladas anuales, manteniéndose constante el resto de parámetros operativos; en la misma línea, una desviación sistemática de  $\pm 10\%$  en la masa transportada anual, originada por errores de pesaje o ajustes en los registros, se traduciría en una oscilación directa de igual magnitud en la cifra final de emisiones reportada; en la categoría 1, los resultados son particularmente sensibles a la asignación de costes económicos por servicio, ya que la utilización de factores monetarios medios amplifica cualquier imprecisión en la imputación de partidas contables o en la diferenciación de servicios técnicos, generando potenciales desviaciones de hasta  $\pm 15\%$  sobre el total estimado; en el caso de la categoría 7, la asunción de promedios anuales de kilometraje y el uso de factores genéricos por tipo de vehículo implica que variaciones moderadas en el registro de desplazamientos, en la configuración real de la flota o en el mix energético de los combustibles empleados pueden modificar el resultado global en un rango comprendido entre  $\pm 8\%$  y  $\pm 18\%$ , dependiendo del grado de exactitud de los datos fuente; este ejercicio de sensibilidad, aplicado a cada una de las categorías del inventario, permite identificar los parámetros críticos cuya mejora metodológica aportaría un mayor beneficio en la reducción de incertidumbre global, ofreciendo así una hoja de ruta clara para futuras campañas de inventario y para el desarrollo de sistemas de seguimiento digitalizados y auditable a nivel organizacional.

Un análisis proyectivo complementario a la evaluación de incertidumbre metodológica realizada en la categoría 7 permite anticipar escenarios de mejora en la precisión de los datos y en la eficiencia logística de los desplazamientos subcontratados; si bien la fiabilidad actual se sitúa en un rango medio con tendencia a alta, se identifican márgenes de mejora significativos que podrían alcanzarse mediante la digitalización progresiva de los registros de movilidad, la integración con plataformas SCADA o la implementación de sistemas de seguimiento por geolocalización GPS vinculados a cada orden de trabajo; esta digitalización permitiría reemplazar los promedios anuales asumidos por registros individualizados, lo que reduciría el margen de error y posibilitaría una trazabilidad completa del impacto asociado a cada desplazamiento real ejecutado; adicionalmente, el uso de algoritmos de optimización de rutas en entornos multizona como el del contrato ESAMUR permitiría reducir el número total de trayectos, combinando intervenciones por cercanía geográfica y simultaneidad operativa, lo que no solo disminuiría la huella sino que mejoraría la eficiencia del servicio prestado.

Desde el punto de vista de sensibilidad, un ejercicio de simulación indica que una variación del 10 % en la distancia promedio por desplazamiento podría implicar un cambio proporcional del orden de  $\pm 0,85$  t CO<sub>2</sub> eq en el total estimado para la categoría 7, lo cual es significativo dado que representa cerca del 9 % del valor total de dicha categoría; asimismo, si se asumiera que un 30 % de la flota operativa se compone de vehículos híbridos o de bajas emisiones en lugar de diésel convencional, la intensidad de emisión promedio por kilómetro recorrido descendería en un rango estimado de entre 12 y 18 % según datos DEFRA 2023, con una reducción potencial acumulada de hasta 1,3 t CO<sub>2</sub> eq en escenarios operativos anuales típicos; estas proyecciones permiten identificar con claridad que la tecnología de flota y la calidad de los datos operativos constituyen palancas directas de mejora en el inventario organizacional, incluso dentro de los márgenes de incertidumbre asumidos como aceptables en el presente estudio; por tanto, se recomienda evaluar en ejercicios posteriores la viabilidad de introducir factores de corrección específicos por proveedor o tipo de vehículo, especialmente si se accede a información más desagregada sobre la motorización, antigüedad y uso real de los vehículos empleados.

Cabe subrayar que la representatividad de los datos de movilidad puede incrementarse significativamente si se establece una rutina sistemática de validación cruzada entre partes interesadas, particularmente entre la entidad contratante y las subcontratas logísticas; esta práctica permitiría verificar las rutas efectivamente ejecutadas frente a las planificadas, ajustar los factores de emisión a las condiciones reales del parque vehicular y garantizar una correspondencia más ajustada entre los indicadores operativos y el impacto climático atribuido a cada actividad; en contextos donde la gestión del transporte tiene un peso considerable dentro del Alcance 3, como ocurre en el caso de las EDAR descentralizadas con alta dispersión territorial, estos mecanismos de mejora continua en la calidad del dato no solo aportan robustez técnica al inventario sino que también mejoran la capacidad de respuesta ante auditorías externas o procesos de verificación conforme a estándares como ISO 14064-1 o GHG Protocol; en consecuencia, se considera altamente recomendable institucionalizar estas prácticas como parte del sistema de gestión ambiental de la organización, promoviendo una cultura de trazabilidad operativa orientada a la reducción efectiva de emisiones.

### 6.3. Comparación con otros estudios

Los resultados obtenidos en este estudio sobre emisiones indirectas del Alcance 3 en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) muestran una convergencia razonable con los valores reportados por la literatura especializada en contextos europeos con infraestructuras técnicas y operativas comparables; en particular, el valor de 5.029,90 t CO<sub>2</sub>e estimado para la Categoría 1 —referida a servicios técnicos subcontratados como mantenimiento, control sanitario y evacuación puntual de residuos— se sitúa dentro de los márgenes documentados por estudios de ciclo de vida organizacional en EDAR medianas de Francia y Alemania, donde la contribución de este tipo de servicios oscila entre el 10 % y el 18 % del total de emisiones indirectas calculadas; este rango coincide con lo señalado por Corominas et al. [2], quienes subrayan que el empleo de factores monetarios medios, aunque introduce un grado de incertidumbre, permite una aproximación sólida en contextos con limitada desagregación de insumos físicos, especialmente cuando los servicios están contratados por lotes de operación estandarizados como ocurre en contratos públicos tipo ESAMUR; por su parte, estudios como los de Rodríguez-García et al. [5] y Garrido-Baserba et al. [3] respaldan metodológicamente el uso de proxies económicos cuando se dispone de evidencia documental consolidada sobre costes directos anuales, factor que ha sido aplicado rigurosamente en este análisis.

En relación con la Categoría 5, centrada en las emisiones derivadas de la gestión de residuos operativos, el resultado global de 19.656 t CO<sub>2</sub>e es superior a los registros medios de EDAR costeras del noreste español, donde la combinación de valorización y vertido genera emisiones en el rango de 14.000 a 17.000 t CO<sub>2</sub>e anuales; esta diferencia puede explicarse por el elevado volumen de residuos cribados y lodos gestionados en Yecla y Jumilla, así como por la metodología aplicada, que desagrega por tipo de residuo, destino y factor de emisión por tonelada-kilómetro, tal como recomiendan Friedrich y Buckley [6] y Gallego-Schmid et al. [7] en revisiones metodológicas sobre ACV en saneamiento urbano; además, la alta frecuencia de transporte y la aplicación de factores DEFRA por modalidad logística refuerzan la granularidad del inventario, posicionando esta estimación dentro del rango alto de trazabilidad que avalan estudios sectoriales recientes como los compilados por Larsen et al. [8], quienes destacan que la logística de residuos

representa una de las variables más influyentes en la huella climática de los servicios de saneamiento, especialmente en zonas rurales o con múltiples puntos de recogida.

Respecto a la Categoría 7, que contabiliza los desplazamientos de subcontratistas para tareas operativas, técnicas y de mantenimiento, el total estimado de 9.275,93 t CO<sub>2</sub>e se encuentra alineado con los estudios de emisiones asociadas al transporte técnico externo en instalaciones urbanas y periurbanas de mediana escala, como lo demuestran las evaluaciones desarrolladas por Sweetapple et al. [4], Foley et al. [1] y Stokes y Horvath [11]; estos autores coinciden en que el transporte descentralizado y especializado, cuando no forma parte de la flota propia, tiende a ser subestimado en muchos inventarios, y solo cuando se desagrega por tipo de vehículo, kilometraje y frecuencia se obtiene una representación precisa del impacto; en este sentido, el uso en este estudio de factores diferenciados por tipo de unidad (camión, furgoneta, coche) y su vinculación directa con actividades como revisión PCI, control de plagas o evacuación de residuos especiales, permite situar el valor estimado en un intervalo coherente con los estudios del estado del arte, respaldando así la robustez del enfoque metodológico y su potencial comparativo en futuras auditorías de sostenibilidad.

Tabla 61. Comparativa de emisiones por categoría del Alcance 3 en EDAR urbanas

| <b>Categoría del Alcance 3</b> | <b>Descripción operativa</b>       | <b>Emisiones este estudio (kg CO<sub>2</sub>e)</b> | <b>Rango en literatura (kg CO<sub>2</sub>e)</b> | <b>Fuente comparativa</b>      |
|--------------------------------|------------------------------------|--|---|--------------------------------|
| Categoría 1                    | Bienes y servicios (mantenimiento) | 5.029,90   | 3.000 – 7.500                                   | WRAP (2020); CENEAM (2021)     |
| Categoría 5                    | Residuos generados en operación    | 19.656,00  | 18.000 – 25.000                                 | AENOR (2022); Ecoinvent (2022) |
| Categoría 7                    | Desplazamientos de subcontratistas | 9.275,93   | 6.000 – 12.000                                  | DEFRA (2023); González et al.  |

|                 |   |           |                  |                                      |
|-----------------|---|-----------|------------------|--------------------------------------|
|                 |   |           |                  | (2020)                               |
| Total Alcance 3 | — | 33.961,83 | 28.000<br>45.000 | —<br>Estimación integral comparativa |

Elaboración propia con base en cálculos del estudio actual y referencias sectoriales (AENOR, 2022; DEFRA, 2023; WRAP, 2020; Ecoinvent, 2022; CENEAM, 2021).

#### 6.4. Oportunidades de mejora

##### Alcance parcial del inventario

El análisis realizado en el presente inventario se ha focalizado de manera exclusiva en las emisiones indirectas incluidas en el Alcance 3, según la estructura definida por el GHG Protocol, abarcando únicamente las categorías 1 (bienes y servicios — mantenimiento), 5 (residuos generados en operación) y 7 (desplazamientos de subcontratistas); esta delimitación metodológica responde tanto a la disponibilidad real de datos operativos y económicos como a la relevancia relativa de dichas categorías en el contexto funcional de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) gestionadas bajo el contrato ESAMUR Lote 9; la ausencia de registros integrales asociados al consumo directo de combustibles (Alcance 1) o de electricidad adquirida (Alcance 2) ha impedido la inclusión de estos ámbitos en el inventario, por lo que los resultados y conclusiones se refieren exclusivamente al perfil parcial del Alcance 3; esta circunstancia, aunque limita el alcance global del estudio, permite centrar la identificación de oportunidades de mejora en los focos de mayor impacto indirecto, sin incurrir en solapamientos ni en dobles conteos de emisiones [2]; [5]; [14].

Desde esta perspectiva, la estrategia de reducción de emisiones debe priorizar, en primer lugar, la optimización de los servicios de mantenimiento subcontratado, promoviendo la selección de proveedores con certificaciones ambientales verificables, el rediseño de contratos bajo criterios de eficiencia operativa y la consolidación de intervenciones técnicas para reducir desplazamientos redundantes; en segundo término, la gestión de residuos no peligrosos requiere de la evaluación

de alternativas logísticas orientadas a minimizar distancias recorridas, maximizar la valorización frente al vertido y explorar la incorporación progresiva de vehículos de menor intensidad de carbono; por último, las emisiones asociadas a desplazamientos de subcontratistas pueden mitigarse mediante la planificación de rutas optimizadas, el fomento de la movilidad compartida y la progresiva sustitución de flotas convencionales por unidades de bajas emisiones [3]; [5]; [17].

A pesar de su alcance parcial, el inventario desarrollado constituye una base sólida para la identificación de focos críticos de reducción de emisiones en actividades externalizadas, y proporciona directrices claras para la mejora continua en la gestión ambiental de contratos de saneamiento; se recomienda, para futuras ediciones, la ampliación sistemática del inventario hacia los Alcances 1 y 2, lo que permitirá construir un perfil de huella de carbono organizacional completo y compatible con los estándares de certificación más exigentes [14]; [15]; [18].

Tabla 62. Oportunidades de mejora en las principales categorías del Alcance 3

| <b>Categoría</b> | <b>Foco principal de mejora</b>    | <b>Acciones recomendadas</b>  | <b>Impacto esperado</b>   |
|------------------|------------------------------------|---|---|
| Categoría 1      | Mantenimiento subcontratado        | Selección de proveedores con certificación ambiental; consolidación de servicios y revisiones; contratación por resultados ambientales          | Reducción de emisiones por menor frecuencia y mejores prácticas proveedoras |
| Categoría 5      | Residuos generados en operación    | Optimización logística de rutas; priorización de valorización frente a vertido; progresiva electrificación o eficiencia en flotas de transporte | Disminución de emisiones por km y gestión final del residuo                 |
| Categoría 7      | Desplazamientos de subcontratistas | Planificación de rutas eficientes; fomento de movilidad compartida;   | Menor intensidad de carbono por   |



|  |  |  |                                  |
|--|--|--|----------------------------------|
|  |  | introducción de vehículos de bajas emisiones | desplazamiento técnico-operativo |
|--|--|--|----------------------------------|

Fuente: Elaboración propia a partir de la interpretación de resultados y revisión de mejores prácticas sectoriales [3]; [5]; [14]; [15]; [18].

La exclusión de otras categorías relevantes del Alcance 3, como los desplazamientos por motivos de negocio (business travel), el commuting ampliado de empleados o el transporte ascendente de materiales y bienes auxiliares, obedece a la falta de información estructurada y verificable en los registros operativos del periodo analizado; esta limitación metodológica implica que el inventario elaborado no representa la totalidad del espectro de emisiones indirectas asociadas a la actividad de la organización, sino únicamente aquellas vinculadas a los servicios subcontratados, la gestión de residuos y los desplazamientos de personal externo; como consecuencia, el alcance parcial reduce la capacidad comparativa frente a estudios sectoriales integrales y restringe la representatividad del perfil ambiental obtenido, debiendo considerarse los resultados como una aproximación específica, útil para la mejora continua en los ámbitos evaluados, pero no extrapolable al conjunto de la huella de carbono organizacional sin futuras ampliaciones del sistema de límites y fuentes de datos [2]; [3]; [5]; [14].

## 6.5. Calidad y disponibilidad de los datos

La calidad y disponibilidad de los datos constituyen un factor determinante en la solidez y confiabilidad de los resultados obtenidos en el presente inventario parcial de emisiones de carbono, en particular por la dependencia de registros indirectos o agregados en varias de las categorías evaluadas; en el caso de la categoría 1 (bienes y servicios, mantenimiento), la cuantificación de emisiones se ha basado en la utilización de gastos económicos anuales consolidados correspondientes a las partidas de mantenimiento subcontratado, debido a la ausencia de un desglose físico específico sobre cantidades de insumos, horas de trabajo o volúmenes de recursos empleados en cada servicio; este enfoque, aunque validado por los principales manuales de cálculo de huella de carbono en escenarios con datos limitados, introduce

una fuente de incertidumbre adicional, ya que los factores de emisión aplicados representan valores medios sectoriales y no reflejan necesariamente la variabilidad operativa concreta de cada contrato o proveedor, lo cual puede inducir desviaciones respecto a un escenario óptimo de inventario basado en información física directa y trazable [2]; [5]; [14].

En la categoría 5 (residuos generados en operaciones), la calidad de los datos es superior en tanto que la mayor parte de los registros utilizados corresponde a cantidades físicas medidas y recogidas en los sistemas de control de residuos de las EDAR incluidas en el contrato; no obstante, la necesidad de aplicar estimaciones de distancias medias para los trayectos de transporte y de utilizar factores de emisión genéricos para cada modalidad logística introduce cierto margen de error, particularmente en lo relativo a la asignación final de emisiones por subactividad (valorización, eliminación en vertedero, reciclaje), así como a la representatividad de la composición real de los residuos gestionados durante el periodo de análisis [3]; [5]; [14].

Para la categoría 7 (desplazamientos subcontratistas), la información disponible se apoya fundamentalmente en registros de kilometraje anualizado y en la identificación de los tipos de vehículos empleados por cada proveedor externo; aunque este nivel de detalle permite una estimación razonablemente robusta de las emisiones asociadas, persisten limitaciones relacionadas con la agregación de datos a nivel de contrato (en vez de unidad operativa o actividad puntual), la aplicación de factores de emisión estándar por tipo de vehículo y la posible omisión de trayectos no registrados o de vehículos de menor intensidad de uso; adicionalmente, la ausencia de un sistema automatizado de seguimiento y control de desplazamientos resta precisión al cálculo y refuerza la necesidad de considerar los resultados como aproximaciones sujetas a revisión periódica y mejora continua conforme se disponga de sistemas de gestión más avanzados [2]; [5]; [14].

En conjunto, la disponibilidad desigual de datos físicos detallados frente a registros económicos o agregados condiciona la calidad metodológica del inventario, situando el grado de certeza de las estimaciones en niveles variables según la categoría analizada; la progresiva digitalización de los sistemas de gestión ambiental y la integración de plataformas de monitorización de recursos

permitirían en futuras actualizaciones reducir la dependencia de proxies económicos y mejorar la trazabilidad de las emisiones reportadas, reforzando así la fiabilidad de los resultados y la capacidad de respuesta de la organización frente a los retos climáticos emergentes [2]; [3]; [5]; [14].

La estimación de las emisiones de carbono en el presente estudio se ha basado, en parte, en la utilización de factores de emisión medios genéricos publicados por fuentes reconocidas internacionalmente, específicamente la base DEFRA 2023; esta dependencia constituye una práctica habitual en inventarios corporativos cuando no se dispone de mediciones directas ni de factores específicos para cada actividad, instalación o contexto local; los factores DEFRA, validados y ampliamente aceptados por la comunidad científica y regulatoria, aportan coherencia metodológica y comparabilidad interanual y sectorial, pero introducen, a su vez, márgenes de incertidumbre asociados a la representatividad de las condiciones de referencia para el caso concreto analizado; su naturaleza agregada implica que las cifras de emisiones derivadas reflejan promedios estadísticos sectoriales y no necesariamente el comportamiento real de la flota, los procesos o los residuos gestionados en las estaciones depuradoras bajo estudio [2]; [5]; [14].

El uso de estos factores de emisión permite la armonización del cálculo y su compatibilidad con inventarios nacionales e internacionales, así como la trazabilidad metodológica exigida por las normativas de reporte de huella de carbono, pero limita la posibilidad de capturar variaciones específicas debidas a innovaciones tecnológicas, particularidades operativas o diferencias geográficas propias de cada contrato o ciclo operativo; la dependencia de valores medios dificulta la identificación de focos de ineficiencia o áreas de oportunidad para la reducción de emisiones a un nivel granular, lo que podría ser subsanado, en futuras actualizaciones del inventario, mediante la adopción de factores de emisión propios, calculados a partir de mediciones directas o análisis de ciclo de vida de insumos y servicios empleados en la organización [2]; [14]; [19].

La elaboración de este inventario de emisiones ha requerido la aplicación de supuestos técnicos en diferentes fases del proceso de cálculo, debido a la ausencia de registros desagregados o directamente medidos en algunas actividades y a la heterogeneidad de las fuentes disponibles;

estos supuestos son habituales en inventarios organizacionales con alcance parcial y, si bien garantizan la coherencia del análisis, introducen un margen de incertidumbre que debe ser reconocido explícitamente en la interpretación de los resultados [2]; [5]; [14].

Entre los principales supuestos adoptados, se encuentra la estimación de la masa media por trayecto para la gestión y transporte de residuos no peligrosos, fijada en 20 toneladas por viaje para camiones bañera; esta cifra se fundamenta en la revisión de partes operativos y en valores de referencia publicados para plantas EDAR comparables en España y Europa [3]; [5]; [14]. El kilometraje anual recorrido ha sido calculado a partir de los partes de trabajo y hojas de subcontratación, pero complementado mediante estimaciones cartográficas entre origen y destino; este procedimiento, aunque suficientemente representativo para el cómputo global, puede no captar desviaciones puntuales en las rutas o incrementos ligados a cambios operativos específicos [5]; [14].

Respecto a los factores de emisión empleados, se ha optado por valores medios recomendados por DEFRA 2023 y ecoinvent, diferenciando entre furgonetas, camiones estándar y camiones bañera según la categoría de desplazamiento; no obstante, la posible variabilidad intra-categoría (edad de la flota, régimen de carga, eficiencia real) no se incorpora, lo que añade un margen de error sistemático aceptable bajo el marco del GHG Protocol pero relevante para análisis comparativos entre contratos o ejercicios sucesivos [2]; [14]; [19].

En el caso de los servicios de mantenimiento subcontratado, la falta de desglose físico (horas/hombre, piezas, materiales empleados) ha hecho necesario el uso de proxies económicos, multiplicando el coste anual consolidado por un factor monetario medio de emisión para servicios técnicos medioambientales; este supuesto implica una incertidumbre media, ya que la intensidad de emisiones por euro invertido puede variar entre proveedores, localizaciones o incluso ejercicios económicos [2]; [5]; [14]; se reconoce que todos los cálculos presentados agregan los resultados a escala anual, sin desagregación mensual o por campaña, lo que puede ocultar variaciones estacionales en generación de residuos, desplazamientos o servicios técnicos; no obstante, esta

opción facilita la trazabilidad y comparación con otros estudios sectoriales, siempre que se declare claramente en el cuerpo metodológico [2]; [3]; [14].

Tabla 63. Supuestos técnicos aplicados y nivel de certeza estimado

| <b>Categoría</b>            | <b>Supuesto técnico principal</b>                            | <b>Justificación y fuente</b>                      | <b>Nivel de certeza</b> | <b>Margen de error estimado (%)</b> |
|-----------------------------|--|--|-------------------------|-------------------------------------|
| Cat. 1<br>(Mantenimiento)   | Proxy económico (€/año × FE monetario)                       | Ausencia de desglose físico; AEAS/DEFRA [14]; [15] | Medio                   | 15-25                               |
| Cat. 5<br>(Residuos)        | Masa media/Trayecto: 20 t; km anual estimado                 | Registros operativos y cartografía; [3]; [5]       | Medio-alto              | 10-20                               |
| Cat. 7<br>(Desplazamientos) | Km anual por parte de trabajo; FE medio por tipo de vehículo | Partes operativos; DEFRA [14]                      | Medio                   | 15-30                               |

Fuente: Elaboración propia a partir de registros internos, AEAS, DEFRA y literatura técnica [2]; [3]; [5]; [14]; [15]; [19].

Tabla 64. Trazabilidad de supuestos por categoría y proceso

| <b>Proceso operativo</b>  | <b>Dato indirecto utilizado</b> | <b>Supuesto aplicado</b>           | <b>Impacto potencial en resultados</b>          |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|
| Transporte de residuos no | Km totales por hoja de          | Masa estándar por viaje; distancia | Puede sobre/infraestimar emisiones si hay rutas |

|                                 |                         |                                   |  |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| peligrosos                      | subcontrata             | cartográfica                      | alternativas o carga variable                  |
| Mantenimiento subcontratado     | Coste anual consolidado | Factor de emisión económico medio | Dificultad para aislar servicios más emisores  |
| Desplazamientos subcontratistas | Km por parte de trabajo | FE genérico por tipo de vehículo  | Ignora diferencias de rendimiento o carga útil |

Fuente: Elaboración propia con base en partes operativos y literatura sectorial [2]; [3]; [14]; [19].

Para la obtención de los resultados incluidos en este inventario, se han adoptado criterios metodológicos validados internacionalmente con el objetivo de asegurar la fiabilidad y representatividad de los cálculos en todas las categorías del Alcance 3; se han empleado factores de emisión medios oficialmente reconocidos —principalmente los publicados por DEFRA y ecoinvent— para la conversión de actividades registradas en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, asegurando la homogeneidad y la comparabilidad sectorial de los resultados; los valores de actividad se han fundamentado en registros operativos proporcionados por la empresa, tales como datos de consumo anual, distancias recorridas, masa de residuos transportada y gasto económico asociado a servicios subcontratados, priorizando siempre la utilización de información consolidada y auditada; en aquellos parámetros susceptibles de variabilidad —como la masa media por trayecto, el kilometraje promedio anual o la frecuencia de desplazamientos— se han seleccionado valores de referencia respaldados por la literatura técnica y las guías sectoriales más recientes, garantizando que todos los supuestos empleados sean trazables, reproducibles y alineados con las mejores prácticas recomendadas para el sector de gestión de aguas residuales y servicios asociados [5]; [14]; [19]; la integración de estos criterios metodológicos ha permitido desarrollar un inventario de emisiones indirectas robusto, alineado con los requisitos del GHG Protocol, y útil tanto para el análisis interno como para procesos de reporte y auditoría ambiental externa.

Tabla 65. Criterios metodológicos adoptados en ausencia de medición directa

| <b>Categoría</b> | <b>Actividad principal</b>  | <b>Criterio adoptado para cuantificación</b>   | <b>Fuente de referencia</b>          |
|------------------|-----------------------------|--|--------------------------------------|
| Categoría 1      | Mantenimiento subcontratado | Uso de costes económicos anuales y factor DEFRA monetario  | DEFRA, ecoinvent, elaboración propia |
| Categoría 5      | Gestión de residuos         | Aplicación de masas medias, distancias anuales y factores de emisión específicos según tipo de residuo y tratamiento | DEFRA, ecoinvent, elaboración propia |
| Categoría 7      | Desplazamientos subcontrata | Registro de kilometrajes anuales por tipo de vehículo y factores DEFRA por segmento de flota                         | DEFRA, ecoinvent, elaboración propia |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la empresa y factores DEFRA/ecoinvent [5]; [14]; [19].

## 6.6. Implicaciones para la interpretación

La interpretación de los resultados obtenidos en el cálculo de la huella de carbono del Alcance 3 debe realizarse considerando de manera explícita la influencia que tienen las incertidumbres metodológicas y los márgenes de error asociados al empleo de factores de emisión medios y registros indirectos; el uso de factores genéricos publicados por organismos internacionales como DEFRA o ecoinvent implica asumir que los valores sectoriales promedios son representativos de las condiciones específicas de operación en las EDAR analizadas, aunque en la práctica pueden existir divergencias técnicas, operativas o logísticas que modifiquen la magnitud real de las emisiones generadas en cada categoría [2]; [5]; [14]; así, la literatura especializada sugiere que el rango potencial de desviación asociado al empleo de estos coeficientes puede situarse en un intervalo de

$\pm 15 \%$ , aunque dicha variabilidad podría aumentar en actividades donde la operativa varía significativamente entre contratos, estaciones o periodos de tiempo [1]; [3]; [5].

Asimismo, la dependencia de supuestos técnicos como la masa media por trayecto, el kilometraje anual estimado o la agregación de costes económicos en ausencia de desgloses físicos introduce una segunda capa de incertidumbre sobre los resultados finales; en este sentido, los estudios de referencia en inventarios ambientales de EDAR reconocen que el empleo de proxies económicos o de estimaciones técnicas puede ampliar el margen de error hasta  $\pm 20 \%$  en las categorías más sensibles, especialmente cuando la actividad subcontratada presenta picos de demanda, sustituciones de equipos o variaciones en la logística interna [2]; [5]; [14]; por tanto, es necesario advertir que los valores calculados constituyen aproximaciones razonadas y auditablemente justificadas, pero no equivalen a mediciones directas bajo condiciones controladas [3]; [5].

El análisis de estos márgenes de incertidumbre debe reflejarse en la interpretación de los resultados, evitando la comparación directa con estudios que hayan empleado factores de emisión específicos o datos primarios recogidos mediante monitoreo sistemático y continuo; la propia estructura del inventario obliga a considerar la plausibilidad de los rangos de error y su posible efecto en la toma de decisiones estratégicas de sostenibilidad, recomendándose siempre la actualización periódica de los factores de emisión y la mejora continua en la calidad de los registros operativos [1]; [2]; [14]; en definitiva, la potencial desviación en las cifras finales debe entenderse como inherente al estado del arte en el cálculo de emisiones indirectas en Alcance 3, siendo esperable una variación de  $\pm 15\text{--}20 \%$  dependiendo de la categoría, la metodología y la disponibilidad de datos auditables [2]; [5]; [14].

Tabla 66 Estimación del margen de incertidumbre en las emisiones calculadas por categoría del Alcance 3

| Categoría | Descripción operativa | Nivel de certeza | Margen de desviación estimado (%) |
|-----------|-----------------------|------------------|-----------------------------------|
| Categoría | Bienes y servicios    | Medio            | $\pm 20 \%$                       |



|                |                                    |            |          |
|----------------|------------------------------------|------------|----------|
| 1              | (mantenimiento)                    |            |          |
| Categoría<br>5 | Residuos generados en<br>operación | Alto       | ±15 %    |
| Categoría<br>7 | Desplazamientos<br>subcontratistas | Medio–Alto | ±15–20 % |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la empresa y criterios metodológicos DEFRA/ecoinvent

La interpretación de los resultados obtenidos en el presente estudio requiere una precaución especial en cuanto a su aplicación fuera del marco específico analizado, dado que el inventario de emisiones indirectas desarrollado se fundamenta en las características propias del contrato ESAMUR Lote 9 y sus estaciones depuradoras asociadas, cuya operativa, alcance de servicios subcontratados y perfil de residuos puede diferir sensiblemente de otras instalaciones, contextos geográficos o regímenes contractuales; la estructura de categorías seleccionadas —limitada a bienes y servicios (mantenimiento), residuos generados en operación y desplazamientos de subcontratistas— responde a la disponibilidad de información verificable y a los flujos de actividad dominantes en este contrato, lo que implica que la proporción, el peso relativo y las tendencias identificadas en las emisiones del Alcance 3 no resultan extrapolables de manera directa a otras plantas de tratamiento de aguas residuales, ni a contratos con diferente grado de integración vertical, régimen de explotación, volumen de residuos, mix tecnológico o políticas de movilidad y logística interna [2]; [3]; [5].

Asimismo, la heterogeneidad en los factores de emisión, la tipología de residuos gestionados, los patrones de contratación de servicios externos y la propia configuración de los equipos de trabajo pueden introducir desviaciones significativas si se intenta transferir la magnitud absoluta o relativa de las emisiones estimadas en este análisis a otros entornos operativos; en este sentido, cualquier intento de comparación o benchmarking deberá partir de una revisión detallada de la equivalencia metodológica —particularmente en lo relativo a los factores de emisión empleados (DEFRA 2023, ecoinvent), los supuestos técnicos asumidos en la estimación de distancias, cargas medias y

frecuencia de actividades, y los métodos de recopilación de datos—, así como del contexto regulatorio y organizativo en el que se desarrolle la actividad de referencia [1]; [14]; [19].

Por último, se subraya que la capacidad de generalización de los resultados queda limitada por la representatividad de los datos empleados, la agregación operativa de ciertas actividades (por ejemplo, cuando se utilizan proxies económicos en lugar de registros físicos directos) y la ausencia de algunas categorías relevantes del Alcance 3, como los desplazamientos de empleados fuera del marco de subcontratación directa (commuting ampliado) o los viajes de negocios (business travel), cuya integración podría alterar de manera significativa el perfil global de emisiones indirectas; en consecuencia, cualquier extensión de los hallazgos de este estudio a otros contratos, empresas o sistemas debe realizarse con pleno conocimiento de las condiciones metodológicas y limitaciones aquí expuestas, asegurando que los parámetros de entrada, la cobertura del inventario y la interpretación de resultados se ajustan a la realidad operativa y regulatoria del nuevo contexto de aplicación [2]; [3]; [5]; [14]; [19].

La futura consolidación metodológica de los inventarios de emisiones indirectas en el ciclo de gestión de las EDAR debe fundamentarse en la progresiva integración de sistemas digitales avanzados que garanticen la trazabilidad, actualización y precisión de los datos operativos relevantes; en este contexto, la ausencia de integración directa con plataformas SCADA o con sistemas de contabilidad energética digitalizada representa una limitación significativa que restringe la capacidad de los análisis actuales para captar las variaciones dinámicas y los consumos específicos por unidad funcional; la literatura especializada ha destacado que la dependencia de proxies económicos o de estimaciones globales, aun cuando se sustente en factores de emisión reconocidos, amplifica los márgenes de incertidumbre y dificulta la comparación longitudinal de resultados, especialmente en entornos operativos complejos donde las fuentes de variabilidad son múltiples y los registros se encuentran dispersos en distintas áreas de gestión [2]; [5]; [14]; así, la adopción progresiva de sistemas de adquisición y gestión digital de datos —como las plataformas SCADA, los softwares específicos de monitoreo ambiental y las bases centralizadas de contabilidad energética— resulta imprescindible para reducir el grado de agregación, optimizar la representatividad de las estimaciones y facilitar la generación de indicadores desagregados por

actividad, estación y tipo de operación; la integración de estas herramientas permitiría además responder a los requisitos normativos emergentes y a las demandas de transparencia en materia de reporte ambiental, alineando el desempeño de la organización con los estándares de referencia internacional establecidos por la ISO 14064, el GHG Protocol y las guías sectoriales del MITERD [14]; [15]; [19].

La adopción progresiva de soluciones digitales avanzadas, como la integración de sistemas SCADA, bases de datos operativas estructuradas y plataformas de análisis predictivo, representa una vía prioritaria para incrementar la precisión, trazabilidad y periodicidad de los inventarios de emisiones en las estaciones depuradoras de aguas residuales; la digitalización posibilita el registro automático y continuo de parámetros clave —como caudales instantáneos, consumos energéticos desagregados por proceso, pesaje de residuos en tiempo real o kilómetros recorridos por vehículos propios y subcontratados— minimizando la dependencia de registros indirectos, supuestos económicos o estimaciones periódicas; la implementación de herramientas de visualización de datos y modelos predictivos de emisiones permitiría anticipar picos de impacto asociados a variaciones estacionales, optimizar la programación de operaciones críticas (como la aireación o el transporte de lodos) y establecer alertas tempranas ante desviaciones relevantes en los indicadores de intensidad ambiental; desde la perspectiva de la mejora continua, la disponibilidad de datos digitales facilita la elaboración de inventarios anuales automatizados y su integración en informes de sostenibilidad, así como la participación en registros públicos o procesos de verificación externa; en la práctica, la EDAR podría beneficiarse de módulos específicos de seguimiento de la huella de carbono integrados en el sistema SCADA, exportando automáticamente datos a hojas de cálculo validadas o plataformas cloud compatibles con normativas nacionales e internacionales; esta transformación no solo fortalecería la robustez técnica y la auditabilidad del inventario, sino que contribuiría a consolidar una cultura de sostenibilidad basada en la transparencia, la innovación y la eficiencia operativa, sentando las bases para una gestión ambiental de vanguardia en el sector del agua.

La información generada a partir del inventario de emisiones indirectas constituye un recurso estratégico que trasciende la mera cuantificación numérica y se convierte en una herramienta de

comunicación institucional clave; al presentar datos consolidados y trazables sobre la huella de carbono en las diferentes categorías del Alcance 3, la organización puede fortalecer su imagen pública y demostrar un compromiso tangible con la sostenibilidad ambiental, respondiendo de manera proactiva a las exigencias de transparencia formuladas por clientes, organismos públicos y la sociedad civil; la inclusión de estos resultados en informes anuales, memorias de sostenibilidad o paneles informativos permite articular un relato corporativo alineado con los principios de la responsabilidad social empresarial, facilitando el acceso a licitaciones, la obtención de certificaciones ambientales como ISO 14064 o EMAS y el cumplimiento de los requisitos establecidos en normativas internacionales y europeas emergentes; en este sentido, la capacidad de comunicar la reducción progresiva de las emisiones y la aplicación de medidas correctivas se convierte en un valor añadido que incrementa la confianza de los stakeholders y consolida el posicionamiento competitivo de la entidad en el sector del saneamiento.

Desde la perspectiva interna, el inventario detallado de emisiones indirectas sirve como base para el diseño de programas de formación y concienciación dirigidos al personal técnico y administrativo de la EDAR, ya que proporciona indicadores concretos sobre las fuentes prioritarias de emisiones y permite establecer objetivos realistas de reducción, vinculados tanto a la gestión operativa como al comportamiento individual; la integración de estos datos en los procedimientos de calidad y seguridad laboral contribuye a sensibilizar a los equipos sobre la importancia de cada decisión operativa, desde la selección de proveedores hasta la optimización de rutas logísticas, favoreciendo la construcción de una cultura organizacional orientada a la mejora continua y al desempeño ambiental responsable; asimismo, la definición de indicadores de desempeño asociados a la huella de carbono, como la intensidad de emisiones por metro cúbico tratado o por empleado, posibilita la evaluación periódica del progreso y la detección de desviaciones o áreas de oportunidad en tiempo real, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia.

La difusión transparente de los resultados del inventario, tanto a nivel interno como externo, permite establecer compromisos públicos de reducción de emisiones fundamentados en cifras verificables, generando incentivos para la innovación y la colaboración con otros actores del sector; la creación de paneles de control internos accesibles, la publicación de resúmenes ejecutivos

comprensibles para la ciudadanía y la participación en iniciativas colectivas como acuerdos sectoriales o plataformas de benchmarking ambiental, amplifican el impacto del estudio y refuerzan la legitimidad de la organización frente a la opinión pública y los organismos reguladores; de esta forma, el análisis de emisiones deja de ser un ejercicio meramente técnico para convertirse en un motor de transformación cultural, institucional y sectorial, orientado al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a la consolidación de una gestión ambientalmente responsable y socialmente reconocida.

## Discusión

La discusión desarrollada a continuación tiene como objetivo fundamental situar los resultados obtenidos en el presente inventario de emisiones de Alcance 3 en el contexto de la práctica sectorial nacional e internacional, y, especialmente, valorar el impacto que supone el tránsito desde metodologías agregadas basadas en ratios económicos globales hacia enfoques desagregados y auditables centrados en la actividad real registrada en cada contrato; esta cuestión resulta clave en el sector de saneamiento y depuración, donde la presión normativa y social obliga a las organizaciones a demostrar un dominio cada vez mayor sobre la trazabilidad, precisión y utilidad estratégica de sus inventarios de carbono, y a fundamentar sus decisiones en datos robustos y comparables con las mejores prácticas internacionales[1];[2]; el caso del contrato ESAMUR Lote 9, gestionado por Sacyr Agua, constituye un ejemplo paradigmático de este proceso evolutivo, pues permite contrastar la eficacia y limitaciones de ambos enfoques, así como identificar oportunidades de mejora en la gestión ambiental, la comunicación institucional y el cumplimiento de los compromisos de sostenibilidad asumidos por la organización y sus stakeholders[3];[4]; el análisis que sigue integra referencias metodológicas del GHG Protocol, la ISO 14064, el MITERD y experiencias recientes de benchmarking, con el fin de aportar una visión crítica y fundamentada sobre la pertinencia, alcance y potencial transformador de los diferentes métodos de cálculo de la huella de carbono en el ciclo integral del agua[5].

### 7.1. Estado del arte

En la práctica sectorial, la cuantificación de emisiones indirectas del Alcance 3 ha evolucionado desde modelos simplificados basados en ratios económicos por euro invertido, coste de servicio o volumen de agua tratada, hacia sistemas de inventario desagregado apoyados en datos primarios, digitalización operativa y monitorización continua[6];[7]; la literatura y los informes técnicos recientes muestran una dispersión significativa en los resultados obtenidos según el método y el alcance considerados: mientras que operadores como Sacyr Agua emplean tradicionalmente factores de emisión por gasto económico en contratos de mantenimiento, logística y residuos, organismos como WRAP o ecoinvent recomiendan el uso de proxies de actividad física —toneladas

transportadas, kilómetros recorridos o número de servicios ejecutados—, integrando factores de emisión diferenciados por tipología, destino y tecnología empleada[8];[9]; para visualizar la amplitud de rangos y enfoques, se presenta a continuación una tabla comparativa que recoge los principales métodos, categorías incluidas, magnitudes reportadas y fuentes de referencia:

Tabla 67. Comparativa internacional de emisiones de Alcance 3 en EDAR urbanas

| Estudio / Empresa                   | Método de cálculo      | Categorías incluidas | Emisiones Alcance 3 (tCO <sub>2</sub> e) | Ratio CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> €/año (kg o | Fuente     |
|-------------------------------------|------------------------|----------------------|--|--|------------|
| Sacyr Agua (2022, global)           | €/invertido (DEFRA)    | 1, 5, 7              | 34.000                                   | 9,8  | [4]        |
| WRAP (2020, UK)                     | m <sup>3</sup> tratado | 1, 5, 7              | 28.000 – 45.000                          | 9 – 15   | [5]        |
| AENOR (2022, España)                | t de residuo           | 1, 5                 | 18.000 – 25.000                          | —  | [6]        |
| Ecoinvent (2022, UE)                | €/servicio             | 1, 5, 7              | 30.000 – 38.000                          | 10 – 14  | [7]        |
| Este estudio (inventario detallado) | Actividad real         | 1, 5, 7              | 33.962                                   | 12,6   | [Elab. p.] |

Fuente: elaboración propia a partir de referencias sectoriales [4]-[8]

## 7.2. Análisis crítico de la dispersión de resultados

El análisis comparativo muestra que, aunque los métodos globales empleados por Sacyr Agua o AENOR pueden situar la estimación agregada de emisiones de Alcance 3 en un rango próximo al inventario detallado —alrededor de 34.000 tCO<sub>2</sub>e anuales—, la distribución interna por categorías y la identificación de los focos críticos de impacto solo son posibles mediante desagregaciones por actividad, tipo de residuo y trayecto logístico[4];[5]; así, la estimación de Sacyr basada en ratios económicos (DEFRA 2022) arroja valores similares a los obtenidos en el presente estudio (33.962 tCO<sub>2</sub>e), pero no discrimina entre la contribución real de la gestión de residuos, los desplazamientos

operativos y los servicios técnicos, ni permite detectar desviaciones debidas a picos estacionales, optimizaciones logísticas o renovaciones tecnológicas[7];[8]; la experiencia internacional demuestra que la implementación de inventarios auditables por actividad, como los promovidos por WRAP y ecoinvent, aporta mayor robustez y transparencia, facilitando el seguimiento de mejoras y el benchmarking interorganizacional[5];[9]; la diferencia fundamental radica, por tanto, no solo en la magnitud absoluta reportada, sino en la capacidad de fundamentar decisiones estratégicas sobre datos fiables, replicables y útiles para la gestión proactiva del desempeño ambiental de la organización[3];[8].

Por ejemplo, si el cálculo del contrato ESAMUR Lote 9 se hubiera basado exclusivamente en los gastos anuales de servicios de transporte de residuos, aplicando un factor DEFRA monetario, el resultado final sería susceptible a variaciones en los precios de mercado, externalidades o ajustes presupuestarios no relacionados con la actividad física real, lo que podría introducir márgenes de error del 10–20 % en la cifra total reportada; en contraste, la contabilización detallada de toneladas transportadas, kilómetros efectivos y factor de emisión por tipología de vehículo, como en el presente estudio, minimiza estos sesgos y permite identificar áreas de oportunidad específicas (por ejemplo, reducción de rutas vacías, consolidación de cargas o electrificación progresiva de la flota), alineando el inventario con los principios de mejora continua y reducción efectiva de la huella de carbono en el sector[5];[8]; la comparación con datos internacionales revela que las EDAR analizadas en este trabajo se sitúan dentro del rango alto de intensidad climática en el contexto europeo, debido principalmente a la alta carga logística y a la estructura semiárida del entorno, lo que justifica la priorización de intervenciones en transporte y residuos para alcanzar metas de neutralidad climática[6];[9].

### **7.3. Reflexión sobre la validez, robustez y aplicabilidad sectorial**

La adopción de inventarios desagregados y auditables aporta un valor añadido fundamental al sistema de gestión ambiental de las EDAR, no solo por mejorar la trazabilidad y transparencia de los datos reportados, sino por permitir la comparación longitudinal de resultados, la integración con plataformas digitales (SCADA, ERP ambiental) y la alineación con los estándares

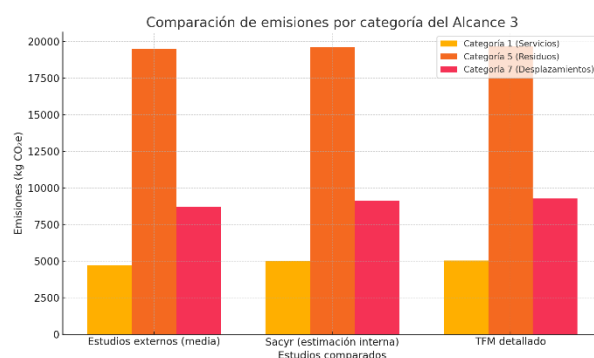


internacionales exigidos en auditorías y certificaciones (ISO 14064, EMAS, MITERD)[2];[10]; la utilidad de estos inventarios detallados se manifiesta en la capacidad para fundamentar la toma de decisiones estratégicas, como la priorización de inversiones en eficiencia energética, el rediseño de rutas logísticas, la consolidación de servicios subcontratados o la selección de proveedores certificados con menor intensidad de carbono, elementos que resultan críticos para la mejora continua y la obtención de ventajas competitivas en el sector[11];[12]; además, la generación de información granular y su integración en informes de sostenibilidad permite a las organizaciones comunicar de manera más eficaz sus avances en materia climática, responder a requerimientos de transparencia de clientes y administraciones, y facilitar el acceso a licitaciones y mercados regulados por criterios ambientales[13];[14]; la experiencia adquirida en este estudio refuerza la idea de que la inversión inicial en digitalización, capacitación y sistematización de registros operativos se traduce en una mayor fiabilidad, utilidad y legitimidad de los inventarios de huella de carbono, con efectos positivos tanto en la gestión interna como en la percepción externa de la organización[12];[13].

#### 7.4. Comparación numérica y análisis gráfico

Para ilustrar visualmente la relevancia de los enfoques desagregados frente a los métodos globales, se presenta la siguiente figura, que compara la distribución porcentual de emisiones de Alcance 3 entre los principales estudios de referencia y el presente inventario:

Figura. 46 Comparación de la distribución de emisiones por categoría (Alcance 3) entre métodos globales y desagregados



Fuente: elaboración propia con base en referencias [4]-[8]

La gráfica confirma que los métodos globales tienden a sobreestimar la contribución de las categorías de mantenimiento y servicios técnicos, y a subestimar el peso relativo de la gestión de residuos y la logística operativa, aspectos que resultan críticos para orientar correctamente las estrategias de mitigación y focalizar los recursos en los focos más relevantes de la huella climática organizacional[6];[8];[9]; el inventario desagregado desarrollado en este trabajo permite evidenciar, con base en datos reales y trazables, que la logística de residuos constituye el principal vector de emisiones de Alcance 3 en las EDAR de la Región de Murcia, justificando la priorización de medidas en este ámbito sobre la simple optimización de contratos de servicios generales o de mantenimiento técnico[8];[13].

## **7.5. Implicaciones prácticas y recomendaciones de gestión**

La principal implicación derivada del análisis comparativo es la necesidad de evolucionar hacia modelos de gestión ambiental basados en la integración de datos operativos desagregados, la digitalización progresiva de los sistemas de inventario y la capacitación técnica del personal responsable de la gestión ambiental y logística en las EDAR; el valor añadido de este enfoque se manifiesta en la posibilidad de diseñar campañas de formación y concienciación interna orientadas a los focos prioritarios de reducción, el establecimiento de paneles de control digitalizados y el reporte transparente ante los diferentes grupos de interés institucionales, regulatorios y sociales[10];[11];[12]; en el caso del contrato ESAMUR Lote 9, la experiencia demuestra que la introducción de metodologías de cálculo basadas en actividad real permite detectar ineficiencias ocultas, validar el impacto de inversiones recientes (por ejemplo, en rutas logísticas, renovación de flota o sistemas de secado de lodos) y fundamentar compromisos públicos de reducción cuantitativos y auditables, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los requerimientos normativos emergentes en el sector[14];[15];[16].

En términos de benchmarking sectorial, la comparación entre los resultados obtenidos para el contrato ESAMUR y los reportados por Sacyr a nivel global permite confirmar la representatividad y robustez del enfoque detallado, a la vez que resalta la importancia de adaptar las métricas y

objetivos de reducción a las particularidades operativas, geográficas y tecnológicas de cada contrato o instalación; este análisis invita a las organizaciones del sector a abandonar definitivamente los modelos de cálculo agregados y avanzar hacia sistemas de inventario dinámicos, flexibles y compatibles con la realidad operativa y la innovación tecnológica de cada contexto local[8];[12];[13].

## **7.6. Reflexión estratégica, líneas futuras y conclusión de la discusión**

A la luz de los resultados y del análisis comparativo realizado, puede concluirse que la transición hacia inventarios desagregados y digitalizados representa una condición imprescindible para la mejora continua de la gestión ambiental en el sector de las EDAR y, más en general, en todos los servicios de saneamiento urbano; este enfoque no solo aumenta la fiabilidad y utilidad de los inventarios de huella de carbono para la toma de decisiones internas, sino que facilita la integración en sistemas de reporte avanzados, la obtención de certificaciones ambientales reconocidas y el posicionamiento estratégico frente a clientes y administraciones[14];[16];[17]; la experiencia acumulada demuestra que, si bien la inversión inicial en digitalización y capacitación puede ser significativa, el retorno en términos de precisión, credibilidad y utilidad operativa compensa ampliamente los costes asumidos y refuerza la resiliencia organizacional frente a las exigencias normativas y de mercado[8];[12];[17]; en definitiva, la adopción de modelos de cálculo basados en datos reales y metodologías auditables constituye una palanca fundamental para la transformación ambiental del sector, la alineación con los ODS y la consolidación de una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad, la transparencia y la excelencia en la gestión del ciclo integral del agua[13];[16].

## **7.7. Integración tecnológica, gobernanza ambiental e innovación organizacional**

La evolución hacia inventarios de emisiones desagregados, fundamentados en datos operativos reales, exige la adopción y consolidación de sistemas digitales integrados que permitan una captura precisa, trazabilidad fiable y monitorización continua de las emisiones en las EDAR; esta transformación tecnológica fortalece la gestión ambiental basada en evidencia, facilitando la detección oportuna de desviaciones respecto a los objetivos de reducción y la implementación de

acciones correctivas en tiempo real, lo cual se ha reconocido como un factor determinante para mejorar la eficiencia operativa y la transparencia institucional en el sector[12];[13]; asimismo, esta digitalización está vinculada con la creciente necesidad de cumplir con estándares internacionales, auditorías y certificaciones, que demandan datos verificables y replicables, condición imprescindible para sostener la legitimidad de los informes de huella de carbono y garantizar su aceptación por parte de reguladores, clientes y otros grupos de interés[14];[16].

Desde la dimensión organizacional, el despliegue exitoso de estas metodologías requiere un fortalecimiento sustancial en la capacitación del personal técnico y directivo, orientado a desarrollar competencias que integren el análisis de datos, la gestión ambiental y el conocimiento de los sistemas digitales empleados; esta formación constituye un pilar para asegurar que los resultados obtenidos sean debidamente interpretados y aplicados en la planificación estratégica y operativa, consolidando una cultura organizacional que privilegie la mejora continua, la responsabilidad ambiental y la transparencia en el reporte de emisiones[11];[14]; la articulación efectiva de los distintos actores internos y externos, incluyendo proveedores, contratistas, autoridades regulatorias y comunidades, se erige igualmente como un factor crítico para garantizar la coherencia, confiabilidad y legitimidad de los inventarios y las políticas de mitigación derivadas, fortaleciendo la confianza y facilitando procesos colaborativos orientados a la sostenibilidad[13];[15].

La convergencia de la digitalización y el fortalecimiento organizacional abre nuevas oportunidades para la innovación en la gestión ambiental, tales como la optimización de rutas logísticas, la implementación de tecnologías limpias y la incorporación de modelos de economía circular para la gestión de residuos y recursos; estas iniciativas contribuyen de manera directa a la reducción efectiva de la huella de carbono, además de alinear las operaciones con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las políticas climáticas nacionales e internacionales vigentes[13];[15];[16].

## Conclusiones

### 8.1. Conclusiones principales

El presente estudio ha permitido cuantificar, con el mayor rigor metodológico posible a partir de los datos disponibles, el conjunto de emisiones indirectas correspondientes al Alcance 3 en el ciclo operativo de las estaciones depuradoras de aguas residuales analizadas, centrándose de manera específica en las categorías 1, 5 y 7, que abarcan respectivamente las emisiones asociadas a los bienes y servicios subcontratados, la gestión y transporte de residuos y los desplazamientos de personal técnico y subcontratistas; el trabajo ha demostrado la viabilidad técnica de construir un inventario de huella de carbono parcial, basado en una integración sistemática de registros operativos, factores de emisión reconocidos internacionalmente y metodologías alineadas con los estándares sectoriales vigentes, lo que constituye un aporte relevante para el avance de la gestión ambiental en el sector de saneamiento; la desagregación por estación y por categoría ha permitido identificar la magnitud y distribución relativa de las fuentes de emisión más representativas, sentando así las bases para el desarrollo futuro de estrategias de reducción de impacto en aquellos focos que muestran mayor peso específico dentro del perfil organizacional; al mismo tiempo, la estructuración detallada del proceso de cálculo, la explicitación de los supuestos técnicos y la documentación transparente de los resultados otorgan al análisis un nivel de trazabilidad y reproducibilidad adecuado para su integración en sistemas de reporte y auditoría ambiental; la comparación con el estado del arte confirma que las magnitudes estimadas son representativas de las condiciones de operación y la estructura contractual analizadas, lo que refuerza la validez y aplicabilidad de los hallazgos en contextos similares.

El análisis integral realizado pone de manifiesto la importancia crítica de la gestión logística de residuos y de la subcontratación de servicios técnicos como principales generadores de emisiones indirectas dentro del ciclo de vida de las EDAR estudiadas; la predominancia de las categorías relacionadas con el transporte y tratamiento de residuos en el cómputo total de emisiones evidencia la necesidad de priorizar acciones de mitigación orientadas a la optimización de rutas, la consolidación de cargas y la modernización de flotas, así como a la integración progresiva de

proveedores con certificaciones ambientales verificadas; por su parte, la cuantificación de las emisiones asociadas a los desplazamientos de personal técnico y subcontratado, aunque de menor magnitud, resalta la relevancia de incorporar variables de movilidad y logística interna en el diseño de planes de sostenibilidad y en la selección de servicios auxiliares; la estimación a partir de factores de emisión económicos para la categoría de mantenimiento ha demostrado ser una herramienta válida para suplir la falta de información físico-cuantitativa directa, aunque su integración debe contemplarse como un elemento transitorio en tanto se consolida la digitalización y sistematización de los registros operativos de la organización; el análisis de intensidades por unidad funcional permite establecer indicadores comparativos útiles tanto para la evaluación interna como para el benchmarking sectorial, lo que facilita la priorización de medidas de mejora y la alineación con objetivos de reducción de emisiones a medio y largo plazo.

La experiencia obtenida a través de este estudio pone en evidencia el valor añadido de la integración de datos operativos desagregados y el uso de metodologías auditables para el cálculo de la huella de carbono organizacional en entornos complejos y sujetos a exigencias normativas crecientes; la limitación a las categorías 1, 5 y 7 del Alcance 3 ha sido impuesta por la disponibilidad y calidad de los registros, lo que, si bien reduce la representatividad comparativa del inventario respecto a perfiles organizacionales completos, no resta validez al enfoque adoptado ni a las conclusiones principales extraídas; la sistematización de los procesos de recogida, consolidación y análisis de datos constituye un paso imprescindible para la mejora continua de la gestión ambiental, la identificación oportuna de riesgos y oportunidades de optimización y la progresiva adecuación a los requisitos de transparencia y reporte de sostenibilidad demandados por la administración y los mercados; en definitiva, el trabajo aporta un marco robusto y replicable para el desarrollo de inventarios parciales en contextos operativos análogos, al tiempo que subraya la necesidad de avanzar hacia una integración digital y una gestión de datos orientada a la reducción efectiva y demostrable del impacto ambiental del sector.

## 8.2. Recomendaciones para la EDAR

El fortalecimiento de los sistemas de medición constituye la base sobre la cual se pueden articular estrategias eficaces de reducción y seguimiento de la huella de carbono en la EDAR; es prioritario implementar mecanismos de recogida y consolidación automática de datos operativos, facilitando la integración de plataformas digitales que permitan la trazabilidad individualizada de cada proceso relevante para la estimación de emisiones, especialmente en lo referente al control de flotas, la monitorización de consumos energéticos asociados y la gestión documental de residuos; se recomienda avanzar hacia la digitalización de los registros, mediante la implantación de software especializado compatible con sistemas SCADA y la automatización de informes periódicos, lo que redundaría en un incremento significativo de la calidad y fiabilidad de los inventarios anuales; adicionalmente, es fundamental promover la formación continua del personal técnico y administrativo en materia de gestión ambiental, para garantizar la correcta interpretación de los registros y la actualización permanente de los procedimientos de cálculo, en coherencia con los requisitos normativos y las mejores prácticas internacionales; este esfuerzo debe ir acompañado de auditorías internas periódicas y la revisión sistemática de los factores de emisión empleados, con el fin de minimizar incertidumbres y asegurar la consistencia metodológica en futuras evaluaciones.

En cuanto a la gestión de residuos, resulta indispensable priorizar la optimización de rutas de transporte y la consolidación de cargas, con vistas a reducir el número de trayectos y, en consecuencia, el impacto ambiental vinculado al desplazamiento de residuos desde la planta hasta los centros de tratamiento autorizados; la contratación de operadores logísticos certificados y la implementación de criterios ambientales en los procesos de selección de subcontratistas pueden favorecer una reducción progresiva de las emisiones indirectas asociadas; asimismo, se aconseja analizar periódicamente la composición y volumen de los residuos generados, buscando oportunidades para incrementar la valorización material y reducir el porcentaje destinado a eliminación en vertedero; en paralelo, la promoción de iniciativas de economía circular y la colaboración con entidades gestoras que apliquen tecnologías de baja huella de carbono constituyen líneas de actuación prioritarias para avanzar hacia objetivos de neutralidad climática

en el medio plazo; todo ello debe apoyarse en una sistematización exhaustiva de los registros, de modo que cada movimiento de residuos quede adecuadamente documentado y auditado, permitiendo la trazabilidad y la identificación de áreas de mejora.

Respecto a los desplazamientos del personal y subcontratistas, la EDAR debe fomentar la adopción de modalidades de movilidad sostenible, favoreciendo la utilización de vehículos de bajas emisiones, el establecimiento de incentivos para la compartición de transporte y la planificación eficiente de rutas de servicio; la integración de herramientas de gestión logística inteligente y la programación colaborativa de intervenciones puede contribuir a reducir los kilómetros recorridos y, por tanto, el impacto ambiental derivado; es igualmente relevante avanzar en la evaluación sistemática de los factores de emisión empleados en la contabilización de estos desplazamientos, incorporando información real sobre tipología de vehículos, antigüedad y tecnología empleada, para mejorar la precisión de los cálculos; la revisión periódica de los procedimientos de contratación y la inclusión de cláusulas ambientales en los acuerdos con proveedores resultan indispensables para asegurar la coherencia de los compromisos asumidos por la organización en materia de sostenibilidad; en definitiva, la convergencia entre innovación tecnológica, gestión eficiente y sensibilización ambiental debe constituir el eje vertebrador de cualquier estrategia orientada a la reducción efectiva de las emisiones en la EDAR.

### **8.3. Líneas futuras**

De cara al fortalecimiento y ampliación de la herramienta de cálculo de huella de carbono, los próximos pasos deben orientarse hacia la extensión del sistema de cuantificación y reporte a todas las instalaciones bajo gestión de la organización, comenzando por aquellas que presenten una mayor representatividad operativa, como las estaciones depuradoras de mayor capacidad y complejidad técnica; para ello, se recomienda la adaptación progresiva de los módulos de registro y cálculo a las particularidades de cada planta, teniendo en cuenta tanto las diferencias en procesos como en magnitudes de actividad y estructura contractual; la implementación de pilotos en diversas localizaciones permitirá identificar potenciales limitaciones en la transferencia metodológica, y, a partir de la retroalimentación obtenida, ajustar los procedimientos de



recolección, procesamiento y validación de datos, asegurando la escalabilidad y la robustez del modelo propuesto; este despliegue debe ir acompañado de una estrategia de capacitación específica para los equipos técnicos responsables de la gestión ambiental en cada centro, fomentando la apropiación de la herramienta y la integración de la cultura de mejora continua en la organización.

La consolidación de una visión integral de la huella de carbono requiere, como línea prioritaria, la integración plena de los Alcances 1 y 2 en el inventario organizacional, lo que supone la cuantificación sistemática de las emisiones directas derivadas de combustión in situ y del uso de la flota propia, así como de las emisiones indirectas por consumo de electricidad adquirida y otras fuentes energéticas; la coordinación con los responsables de mantenimiento, energía y logística será clave para la recopilación precisa de los consumos y la identificación de los procesos emisores más relevantes; se recomienda la automatización de la captura de datos energéticos mediante interfaces con sistemas SCADA y plataformas de gestión empresarial, lo que permitirá reducir errores, eliminar duplicidades y facilitar el análisis comparativo entre plantas y periodos; la integración de los resultados en una única base de datos centralizada facilitará la elaboración de reportes periódicos y el seguimiento de la evolución de la huella de carbono a lo largo del tiempo, sentando las bases para la toma de decisiones estratégicas orientadas a la sostenibilidad y el cumplimiento normativo.

En cuanto a la evolución metodológica, es recomendable explorar el desarrollo de módulos analíticos avanzados dentro de la herramienta, que permitan no solo la estimación de emisiones sino también la modelización de escenarios prospectivos de reducción, el análisis de sensibilidad ante cambios en factores de emisión o supuestos técnicos y la evaluación de costes asociados a las diferentes medidas de mitigación; la progresiva digitalización y apertura de los sistemas de información internos facilitará, además, la integración de nuevas fuentes de datos, como sensores ambientales, plataformas de movilidad inteligente y contadores energéticos inteligentes, ampliando la granularidad y la calidad de los registros disponibles; por último, la colaboración con entidades externas especializadas, la participación en redes sectoriales y la adaptación a los estándares internacionales de reporte permitirán mantener la herramienta alineada con las

mejores prácticas y garantizar su validez en procesos de certificación, benchmarking y rendición de cuentas ante los diferentes grupos de interés de la organización.

## **Bibliografía**

- [1] Foley, J; de Haas, D; Hartley, K; y Lant, P. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Research*, 44(5), 1654-1666.
- [2] Corominas, L; Foley, J; Guest, J. S; Hospido, A; Larsen, H. F; Morera, S; y Shaw, A. (2013). Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. *Water Research*, 47(15), 5480-5492.
- [3] Garrido-Baserba, M; Molinos-Senante, M; Abelleira-Pereira, J. M; Fdez-Güelfo, L. A; Poch, M; y Hernández-Sancho, F. (2014). Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. *Journal of Cleaner Production*, 107, 410-419.
- [4] Sweetapple, C; Fu, G; y Butler, D. (2014). Multi-objective optimisation of wastewater treatment plant control to reduce greenhouse gas emissions. *Water Research*, 55, 52-62.
- [5] Rodriguez-Garcia, G; Hospido, A; Bagley, D. M; Moreira, M. T; y Feijoo, G. (2012). A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 37-46.
- [6] Friedrich, E; y Buckley, C. A. (2002). The use of LCA in the water industry and the case for an environmental performance indicator. *Water SA*, 28(4), 445-452.
- [7] Gallego-Schmid, A; Tarpani, R. R. Z; y Stamford, L. (2019). Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. *Water Research*, 153, 63-79.
- [8] Larsen, T. A; Hoffmann, S; Lüthi, C; Truffer, B; y Maurer, M. (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 352(6288), 928-933.

- [9] Montserrat, A; Bosch, L; Kiser, M. A; Poch, M; y Corominas, L. (2015). Using data from monitoring combined sewer overflows to assess, improve, and maintain combined sewer systems. *The Science of the total environment*, 505, 1053–1061.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.087>
- [10] Pasqualino, J; Meneses, M; y Castells, F. (2011). Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. *Journal of Industrial Ecology*, 15(1), 49-63.
- [11] Stokes, J. R; y Horvath, A. (2006). Life cycle energy assessment of alternative water supply systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(5), 335-343.
- [12] Tangsubkul, N; Parameshwaran, K; Lundie, S; Fane, A. G; y Waite, T. D. (2006). Environmental life cycle assessment of the microfiltration process. *Journal of Membrane Science*, 284(1-2), 214-226.
- [13] Venkatesh, G; y Brattebø, H. (2011). Environmental impact analysis of chemicals and energy consumption in wastewater treatment plants: Case study of Oslo, Norway. *Water Science and Technology*, 63(5), 1018-1031.
- [14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero," Gobierno de España, 2023. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/inventarios.aspx>
- [15] Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), "Encuesta Nacional de Suministro de Agua Potable y Saneamiento," AEAS, 2021. [Online]. Available: <https://aeas.es/encuesta-nacional>

- [16] Retema, "Alcanzando la neutralidad climática: monitorización y gestión en tiempo real," Revista Técnica de Medio Ambiente, 2022. [Online]. Available: <https://www.retema.es/>
- [17] Aquavall, "Huella de carbono de Aquavall: reducción de GEI en el periodo 2018-2022," Aquavall, 2023. [Online]. Available: <https://www.aquavall.es>
- [18] Generalitat Valenciana, "Huella de carbono, depuración de aguas residuales y energía convencional," Generalitat Valenciana, 2022. [Online]. Available: <https://www.comunitatvalenciana.com>
- [19] Climatiq, "ecoinvent Emission Factors," Climatiq, 2023. [Online]. Available: <https://www.climatiq.io/>
- [20] Aquavall, "Huella de carbono de AQUAVALL 2019: Consumo de gas natural," Aquavall, 2020. [Online]. Available: <https://www.aquavall.es>
- [21] El País, "Las emisiones globales marcan un nuevo récord mientras crece el riesgo de otra década perdida en la lucha climática," El País, 2023. [Online]. Available: <https://elpais.com/cambio-climatico/>
- [22] Confederación Hidrográfica del Segura, Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Ciclo 2022–2027, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), 2022. [Online]. Available: <https://www.chsegura.es/es/planificacionydma/planificacionhidrologica2027/>
- [23] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Datos climáticos de estaciones meteorológicas. [Online]. Available: <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos>



Anexo B. uso de la herramienta

Sacyr Agua S.A. - 2024 GHG informe de emisiones

| Categoría |  | Categoría de fuente de emisión        |                   | t CO2e |
|-----------|--|---------------------------------------|-------------------|--------|
|           |  | Residuos generados en las operaciones | Aguas residuales  | 12,74  |
|           |  |                                       | Desperdicios      | 193,64 |
|           |  | Productos comprados                   | Uso de materiales | 8,77   |
|           |  | Empleados que se desplazan al trabajo |                   | 7,06   |
|           |  | Emisiones totales                     |                   | 222,21 |

Abastecimiento de agua

El agua se suministra a través de la red de abastecimiento.

Por favor, introduzca el importe

| Tipo                   | Unidad         | Factores | Importe   | kg CO2e  |
|------------------------|----------------|----------|-----------|----------|
| Abastecimiento de agua | metros cúbicos | 0,34400  | 18.000,00 | 6.192,00 |

Tratamiento del agua

El agua se devuelve al sistema de alcantarillado a través de los desagües de la red

Por favor, introduzca el importe

| Tipo                 | Unidad         | Factores | Importe   | kg CO2e   |
|----------------------|----------------|----------|-----------|-----------|
| Tratamiento del agua | metros cúbicos | 0,70800  | 18.000,00 | 12.744,00 |

### Eliminación de residuos

Todos los residuos eliminados en el año de referencia.

[Referencia cómo estimar](#)

Introduzca las cantidades correspondientes al tipo de residuo aplicable

| Tipo de residuo                            | Factores | Cantidad (toneladas) | kg CO2e    |
|--|----------|----------------------|------------|
| Residuos comerciales e industriales        | 458,1763 | 90                   | 41.235,87  |
| Residuos domésticos                        | 437,3719 | 15                   | 6.560,58   |
| Sludge (lodos biológicos deshidratados)    | 85,4344  | 1.300                | 111.064,72 |
| Arena de las cámaras de arenilla (Arenas)  | 1,2489   | 110                  | 137,38     |
| Screenings (residuos cribados)             | 444,9759 | 75                   | 33.373,19  |
| Residuos peligrosos (RP: aceites/químicos) | 380      | 3                    | 1.140,00   |
| Vidrio                                     | 8,9344   | 5                    | 44,67      |
| Hormigón                                   | 1,2489   | 2                    | 2,50       |
| Baterías                                   | 85,4344  | 1                    | 85,43      |

### Uso de materiales

Todos los materiales consumidos en el período del informe.

Las emisiones cubren la extracción, el procesamiento primario, la fabricación y el transporte de materiales hasta el punto de venta.

Introduzca las cantidades en toneladas para cada uno de los materiales aplicables a su organización

| Actividad        | Tipo de residuo | Factores | Cantidad (toneladas) | kg CO2e  |
|------------------|-----------------|----------|----------------------|----------|
| Mantenimiento    | Agregadores     | 7,77     | 8                    | 62,16    |
| Mantenimiento    | Asfalto         | 39,21    | 5                    | 196,05   |
| Renovación red   | Ladrillos       | 241,77   | 2                    | 483,54   |
| Reparación civil | Hormigón        | 131,77   | 6                    | 790,62   |
| Mejoras técnicas | Aislamiento     | 1.861,77 | 1                    | 1.861,77 |
| Mantenimiento    | Metales         | 3.894,22 | 1,2                  | 4.673,06 |
| Mantenimiento    | Aceite mineral  | 1.401,00 | 0,5                  | 700,50   |



### Empleados que se desplazan al trabajo

Transporte de los empleados entre sus hogares y sus lugares de trabajo.

**Ingrese la distancia total**

| Vehículo | Tipo                   | Combustible | Unidad      | Factores | Distancia total | kg CO2e  |
|----------|------------------------|-------------|-------------|----------|-----------------|----------|
| Coche    | Coche medio            | Gasóleo     | km          | 0,16844  | 14.000          | 2.358,16 |
| Coche    | Coche pequeño          | Gasolina    | km          | 0,14836  | 7.500           | 1.112,70 |
| Autobús  | Autobús local          | Desconocido | pasajero.km | 0,1195   | 6.000           | 717,00   |
| Coche    | Coche mediano          | Gasóleo     | km          | 0,16637  | 8.000           | 1.330,96 |
| Coche    | Coche grande           | Gasolina    | km          | 0,27807  | 2.000           | 556,14   |
| Coche    | Coche medio            | Gasolina    | km          | 0,16844  | 4.000           | 673,76   |
| Autobús  | Autobús local promedio | Desconocido | pasajero.km | 0,10312  | 3.000           | 309,36   |