



UNIVERSITAT DE VIC
UNIVERSITAT CENTRAL
DE CATALUNYA



Beta

Biodiversitat, Ecologia,
Tecnologia Ambiental i Alimentària

EVALUACIÓN AMBIENTAL Y TECNO-ECONÓMICA DEL COMPOSTAJE COMUNITARIO COMO VÍA ÚNICA DE GESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Por

ANGÉLICA MARÍA OVIEDO OSPINA

Tesis presentada para cumplir con los requisitos para la
obtención del título de Doctora en Ciencias Experimentales y Tecnología

2025

La presente tesis titulada «Evaluación ambiental y tecno-económica del compostaje comunitario como vía única de gestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales», de Angélica María Oviedo Ospina, se ha realizado en el Centro Tecnológico para la Biodiversidad, Ecología, Medio Ambiente y Tecnologías Agroalimentarias (BETA Tech. Centre) de la Universitat de Vic – Universitat Central de Catalunya (UVic-UCC), bajo la dirección de la Dra. María Isabel Mora Garrido y el Dr. Joan Colón Jordà.

Mabel Mora Garrido

Joan Colón Jordà

«Un viaje de mil millas comienza con un primer paso.»

Lao-Tse

«Where you place your attention is where you place your energy.»

Joe Dispenza

A quien me acompaña en silencio... MARO.

*La ilustración de la portada fue creada por **Paulina Brena Bustamante**, a quien agradezco su aporte artístico a esta tesis.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al *universo* por darme la energía, la valentía y la determinación necesarias para alcanzar este propósito, y por enseñarme que el verdadero crecimiento ocurre durante el camino, no solo al llegar a la meta.

A mí, *Angélica*, por no rendirte, por seguir creyendo incluso cuando las dudas y el cansancio intentaban ganar terreno. Gracias por mantener el corazón lleno de amor, resiliencia, convicción, y por recordar que sí era posible.

A mis abuelos, *Alicia Martínez y Rafael Oviedo*, cuya presencia constante desde la distancia, amor incondicional y sabios consejos siempre me han acompañado.

A mi padre, *Rafael Oviedo*, por su amor sin condiciones, sus palabras de aliento en los momentos más difíciles, la escucha paciente y el ejemplo con el que sana y enseña.

A mi madre, *Lucía Ospina*, por su amor infinito, sus oraciones y su compañía constante y poderosa, siempre presente en cada paso de este camino.

A mis hermanos: *Carlos Andrés*, por su apoyo personal y profesional, por recordarme que nunca estuve sola y por las hermosas fotografías que hoy acompañan parte de esta investigación; *Víctor Manuel*, por su ayuda y estar siempre ahí sin importar la distancia ni la diferencia horaria; y *Ana Camila*, por acompañarme con su alegría genuina y ternura.

A mi clan femenino *Paola, Johanna, Samet, Angela, Osiris, Maira, Eugenia, Hande, las Bertas*. amigas incondicionales, algunas en la distancia física, otras no tanto gracias por escuchar mis pensamientos más sinceros y mis crisis con una empatía infinita.

A toda mi familia —tíos, tías, primas y primos— por su apoyo incondicional y bondadoso, por celebrar conmigo cada logro, sin importar la distancia que nos separa.

A mis segundas madres, *Nelly Julieta y María Helena*, por su cariño, apoyo y presencia.

Nelly, gracias por aparecer en un momento decisivo de mi vida; sin ti, este viaje no habría sido posible. *María Helena*, gracias por tu afecto sereno y constante.

A *Agus* y su pack de amigos, *Jesús y Berta: Agus*, llegaste en la etapa final de este proceso brindándome amor sincero, equilibrio y motivación cuando más lo necesitaba. *Jesús y Berta*, gracias por integrarme, por su apoyo, cariño y, sobre todo, por las risas y los buenos momentos.

Jesús, gracias especiales, por una frase que se quedó conmigo y que hoy da sentido a este cierre.

A mis amigos en Colombia —*Carlos Parrado, Jorge Ramos, Jeffer Ancenio, Andrea Ramírez*— y al resto del *parche*, por estar presentes a pesar del tiempo y la distancia.

A mis amigos(as) y colegas del BETA y de otras partes del mundo —*Carlos, Isabella, Laura, Alex, Dianella, Zoe, Pedro, Lluís, Miquel, Enric, Roser, Georgina, Jonathan, Nancy, Katharina, Rosa Fibla, Pablo, Tiago, Ipan, Nagore, Lidia, Cristina, Daniel, Imane*— gracias por compartir conocimiento, experiencias, oportunidades, risas y amistad a lo largo de este camino académico.

A la familia *BETA*, especialmente a *Sergio y Laia*, por acogerme, por darme la oportunidad de crecer y por permitirme formar parte de un proyecto tan valioso para el medio ambiente.

A mis directores de tesis, *Joan Colón y Mabel Mora*, por su guía, compromiso y acompañamiento a lo largo de este proceso, me siento profundamente afortunada de haber contado con ustedes como directores. No fue un camino fácil: hubo momentos de mucha exigencia, de dudas y de aprendizajes intensos. Pero cada uno de esos desafíos me ayudó a crecer, a fortalecerme y a comprender el verdadero valor de la investigación y de la perseverancia. Gracias por haber creído en este proyecto, por su tiempo, su exigencia y su dedicación, y por acompañarme —con sus diferencias y coincidencias— hasta ver materializado este logro.

Al Proyecto *DECOST* (Decentralised Composting in Small Towns), por haber hecho posible esta investigación a través de su apoyo técnico, científico y financiero. Agradezco a todo su equipo por su compromiso con la sostenibilidad y la innovación social. Este trabajo forma parte de esa visión compartida de transformar la materia orgánica en un recurso que nutre comunidades y territorios.

Al Ayuntamiento de *Les Masies de Roda*, especialmente al alcalde *Jordi Vistós*, y al equipo de la brigada —*Guillem Dalmau, Ferran Mercader* y todos los colaboradores—, por su apoyo, cercanía y compromiso con este proyecto. El aprendizaje mutuo y el intercambio constante de experiencias hicieron posible avanzar con solidez en los aspectos técnicos, demostrando que la colaboración entre la ciencia y la gestión local puede generar transformaciones reales hacia la sostenibilidad.

En muchos sentidos, este trabajo ha sido como el propio proceso de compostaje: una transformación paciente, compleja y llena de vida. Cada idea, cada error, cada aprendizaje se fue descomponiendo y reconfigurando hasta generar algo nuevo, fértil y con propósito.

Así como la materia orgánica se convierte en vida renovada gracias al tiempo, la colaboración y el equilibrio, esta tesis es el fruto de un proceso colectivo, donde la ciencia, las personas y la naturaleza se mezclan para crear conocimiento que nutre y transforma.

A todos aquellos que, de una u otra forma, dejaron su huella en este proceso —aunque sus nombres no estén escritos aquí—, gracias. Cada palabra de aliento, cada gesto y cada encuentro formaron parte del suelo fértil que hizo posible este logro.

!!!Gracias por esta COMPOSTESIS!!!

TABLA DE CONTENIDO

Listado de Acrónimos y Abreviaciones XXV

Resumen..... XXVII

Abstract XXXI

Resum XXXV

Prefacio..... XXXIX

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 3

1.1. CONTEXTO GLOBAL Y GENERAL.....3

1.2. MARCO TÉCNICO Y LEGAL EN LA GESTIÓN
DE LOS RESIDUOS MUNICIPALES EN EL MUNDO,
EUROPA, ESPAÑA Y CATALUÑA 4

1.2.1. España.....7

1.2.2. Cataluña.....8

1.3. GENERACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS
MUNICIPALES EN ESPAÑA 9

1.3.1. Generación y gestión de los residuos municipales
en Cataluña.....10

1.3.2. Marco financiero para la gestión de la fracción
orgánica en Cataluña.....11

1.3.3. Calidad y gestión de la fracción orgánica en Cataluña 11

1.4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN
ORGÁNICA 12

1.4.1. Sistema de compostaje centralizado (SCC) 13

1.4.2. Sistema descentralizado de Compostaje (SDC) 14

1.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA
DE COMPOSTAJE DESCENTRALIZADO 16

1.6. EL PROYECTO DECOST 17

1.7. CASOS EXITOSOS DEL COMPOSTAJE
COMUNITARIO DESCENTRALIZADO.....19

1.7.1. Evaluación ambiental 22

1.7.2. Análisis tecno económico y social.....23

1.7.3. Características del compost obtenido en el
compostaje descentralizado y sus usos
en proyectos de agricultura urbana 25

1.8. IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS
EN EL CONOCIMIENTO 27

1.8.1. Descripción de la brecha 27

1.8.2. Impacto de la brecha 28

1.8.3. Limitaciones del estudio.....29

CAPÍTULO II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 33

2.1. HIPÓTESIS 33

2.2. OBJETIVO GENERAL 33

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....33

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....37

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL LES MASIES
DE RODA -LMR- 37

3.1.1. Ubicación 37

3.1.2. Características del suelo y clima.....38

3.1.3. Contexto social y demográfico.....40

3.1.4. Actividades Económicas 41

3.1.5. Generación de residuos 42

3.1.6. Problemática asociada 43

3.1.7. Generación de residuos orgánicos.....45

3.2. FUNCIONAMIENTO MODELO ANTERIOR 47

3.2.1. Recolección de residuos 47

3.2.2. Tratamiento y aprovechamiento de los residuos 49

3.2.3. Disposición final 50

3.2.4. Modelo financiero anterior del sistema de gestión
de la fracción orgánica.....52

3.3. NUEVO MODELO DE GESTIÓN 56

3.3.1. Dimensionamiento del sistema.....58

3.3.2. Ubicación y distribución 61

3.3.3. Adecuación del terreno.....66

3.3.4. Dimensionamiento y Construcción de áreas
de compostaje comunitario descentralizado 68

3.3.5. Dimensionamiento y Construcción de área
de postprocesamiento 73

3.4. ESCENARIOS OPERATIVOS.....79

3.4.1. Escenarios de operación SDC.....79

3.5. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS, INDICADORES
AMBIENTALES 80

3.5.1. Determinación del contenido de humedad y materia seca 81

3.5.2. Determinación de sólidos volátiles 81

3.5.3. Determinación de pH y conductividad eléctrica.....82

3.5.4. Determinación de compuestos nitrogenados:
Nitrógeno total Kjeldahl (TKN) 82

3.5.5. Evaluación de la actividad biológica:
Prueba respirométrica dinámica.....83

3.5.6. Muestreo y análisis de emisiones gaseosas 85

3.5.7. Huella carbono 87

3.6. INDICADORES ECONÓMICOS 88

3.7. ASPECTOS E INDICADORES SOCIALES 92

3.7.1. Marco metodológico de evaluación social.....97

CAPÍTULO IV. RESULTADOS DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE COMUNITARIO DESCENTRALIZADO (SCD): EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL 101

CAPÍTULO IV. SECCIÓN 1. EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE: DESEMPEÑO OPERATIVO, EFICIENCIA Y CALIDAD DEL PRODUCTO 105

4.1. RELACIÓN CON LOS MATERIALES Y MÉTODOS 106

4.1.1. Descripción de los escenarios operativos 108

4.1.2. Análisis y selección del escenario óptimo 131

4.1.3. Área de postprocesamiento 142

4.1.4. Balance de masa y materia 143

4.1.5. Balance de carbono 152

4.1.6. Balance de nitrógeno 153

4.1.7. Balance hídrico 153

4.1.8. Rendimiento y eficiencia del proceso 153

4.1.9. Implicaciones técnicas y ambientales 154

4.1.10. Calidad del compost obtenido 159

4.1.11. Prototipo propuesto compostador optimizado 166

4.1.12. Propuesta conceptual de camión multifuncional para compostaje descentralizado 168

CAPÍTULO IV. SECCIÓN 2. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL 173

4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL 174

4.2.1. Evaluación económica 174

4.2.2. Evaluación social 189

CAPÍTULO IV. SECCIÓN 3. EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) 207

4.3. OBJETIVO ALCANCE Y UNIDAD FUNCIONAL 207

4.3.1. Límites del sistema y procesos considerados 210

4.3.2. Inventario: entradas, salidas y supuestos metodológicos 214

4.3.3. Factores de emisión y caracterización 215

4.3.4. Cálculo de emisiones directas e indirectas 219

4.3.5. Metodología de evaluación de impacto (GWP100) 224

4.3.6. Resultados del sistema centralizado (SCC) 225

4.3.7. Resultados del sistema descentralizado (SDC) 232

4.3.8. Comparación entre SCC y SDC 234

4.3.9. Beneficios ambientales complementarios 237

4.3.10. Limitaciones del estudio y recomendaciones 239

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN GENERAL 243

5.1. LECCIONES DESDE LA EXPERIENCIA DE LES MASIES DE RODA 244

5.1.1. Perspectiva del mercado europeo 245

5.2. APLICABILIDAD TERRITORIAL Y LÍMITES DEL MODELO 246

5.2.1. Replicabilidad en España 247

5.2.2. Replicabilidad en Europa 248

5.2.3. Recomendaciones según el tamaño del municipio 249

5.3. VIABILIDAD FINANCIERA DEL MODELO: ESCENARIOS Y MECANISMOS DISPONIBLES 250

5.4. DINÁMICA DE MERCADO Y PROYECCIONES DE CRECIMIENTO 253

5.4.1. Capacidad instalada y grado de consolidación del compostaje descentralizado en Cataluña 254

5.4.2. Mercado potencial en Cataluña y España 254

5.4.3. Proveedores y tecnologías disponibles 255

5.4.4. Proyecciones de crecimiento del mercado 255

5.5. EL COMPOST COMO RECURSO ESTRATÉGICO: DEMANDA, CALIDAD Y USOS 256

5.6. HACIA UN MARCO ESTRUCTURAL
DE IMPLANTACIÓN: MÁS ALLÁ DE LOS
RESULTADOS OBTENIDOS 257

**CAPÍTULO VI . CONCLUSIONES,
RECOMENDACIONES
E INVESTIGACIONES FUTURAS.....261**

6.1. CONCLUSIONES 261

6.2. RECOMENDACIONES.....264

6.3. INVESTIGACIONES FUTURAS 264

BIBLIOGRAFÍA.....267

ANEXOS 283

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.1. Localización y distribución geográfica
Les Masies de Roda.....38

Figura 3.2. Vista área del Barrio Del Vicenç
en Les Masies de Roda 39

Figura 3.3. Composición de residuos sólidos
municipales LMR.....43

Figura 3.4. Ejemplo caso de turismo de residuos 44

Figura 3.5. Efectos en la generación de residuos
municipales por turismo de residuos 45

Figura 3.6. Localización de los contenedores en acera 48

Figura 3.7. Gestión de los residuos municipales
LMR modelo anterior.....51

Figura 3.8. Evolución del canon de disposición.....54

Figura 3.9. Bolsas y contenedores para la materia orgánica 57

Figura 3.10. Proceso de compostaje comunitario
descentralizado 58

Figura 3.11. Mapa asignación de áreas de compostaje 62

Figura 3.12. Número de módulos ajustados
por área de Compostaje 65

Figura 3.13. Mapa de distribución de compostadores
en el Municipio LMR.....66

Figura 3.14. Preparación del terreno para la instalación
del área de compostaje 68

Figura 3.15. Dimensiones áreas de compostaje.....69

Figura 3.16. Partes del sistema de compostaje 71

Figura 3.17. Ejemplo área de compostaje instalada.
Módulo de aportación 72

Figura 3.18. Tipos de áreas de compostaje instaladas	73
Figura 3.19. Equipos instalados área de post-procesamiento	74
Figura 3.20. Sistema de elevación y descarga del compost área de Post-procesamiento	75
Figura 3.21. Cinta transportadora.....	76
Figura 3.22. Tromel.....	77
Figura 3.23. Infraestructura del área de Post-procesamiento del Compost.....	78
Figura 3.24. Respirometrias dinámicas del compost obtenido	84
Figura 3.25. Equipos utilizados para muestreo de emisiones. Equipo multiRAE.....	86
Figura 3.26. Folleto informativo sobre el nuevo SCD	94
Figura 3.27. Registro fotográfico de las actividades de sensibilización	96
Figura 4.1. Escenarios de pasos de transvase con mezcla manual	112
Figura 4.2. Herramienta manual utilizada para la aireación y mezcla.....	113
Figura 4.3. Proceso de aireación manual realizado en módulos de compostaje comunitario.....	114
Figura 4.4. Secuencia del proceso de trasvase manual entre módulos de compostaje comunitario.....	115
Figura 4.5. Elementos operativos utilizados para el cargue, descargue y traslado de compost en sistemas descentralizados.....	116
Figura 4.6. Escenario 1A y Escenario 1B dedicación [horas/año] por actividad.....	117
Figura 4.7. Implementación de rollcontainers en escenarios 2A y 2B para evitar el transvase manual entre módulos	119
Figura 4.8. Almacenamiento y suministro de estructurante	119
Figura 4.9. Cargue y descargue mecanizado mediante pluma hidráulica instalada en remolque	120

Figura 4.10. Escenario 2A y Escenario 2B dedicación horas/año por actividad	121
Figura 4.11. Herramientas utilizadas en los escenarios mecanizados del SDC.....	122
Figura 4.12. Equipo de operativo Ayuntamiento LMR y Centro tecnológico Beta.....	123
Figura 4.13. Esquema operativo del escenario 3A del SDC en LMR.....	125
Figura 4.14. Escenario 3A horas/año por actividad.	127
Figura 4.15. Operación mecanizada del compostador	129
Figura 4.16. Prototipo circular de hierro para compostaje mecanizado en el escenario 3B	130
Figura 4.17. Escenario 3B horas/año por actividad	131
Figura 4.18. Evolución de escenarios operativos y beneficios técnicos.....	132
Figura 4.19. Distribución de tiempo por actividad y escenario	133
Figura 4.20. Distribución porcentual de horas operativas por actividad.....	134
Figura 4.21. Reducción acumulada de horas operativas respecto al escenario 1 A	134
Figura 4.22. Reducción de horas por actividad según escenario	136
Figura 4.23. Comparación de escenarios según criterios cualitativos.....	141
Figura 4.24. Número de bolsas promedio por mes.	144
Figura 4.25. Comportamiento aportación por áreas de compostaje y Barrios	145
Figura 4.26. Recepción y caracterización inicial de la FORM	145
Figura 4.27. Ejemplos de impropios en el módulo de aportación.....	146

Figura 4.28. Análisis de las variaciones estacionales	147
Figura 4.29. Distribución porcentual de los aportes de materia orgánica por barrio	148
Figura 4.30. Gestión de estructurante	151
Figura 4.31. Suministro de agua durante el proceso	151
Figura 4.32. Esquema del balance de nitrógeno y carbono	152
Figura 4.33. Método empleado para monitorizar el oxígeno en el sistema de compostaje.....	159
Figura 4.34. Muestra de compost obtenido del SCD de LMR.....	162
Figura 4.35. IRD análisis	164
Figura 4.36. Prototipo de nuevo compostador en un SDC.....	168
Figura 4.37. Propuesta conceptual de camión multifuncional para el SDC.....	169
Figura 4.38. Representación del coste por cada actividad de la operación	178
Figura 4.39. Valor presente neto	184
Figura 4.40. Análisis de sensibilidad del gasto operativo (OPEX)	188
Figura 4.41. Resultados encuesta: Conocimiento de la ciudadanía respecto al SDC.....	191
Figura 4.42. Resultados encuesta: Nivel de satisfacción	192
Figura 4.43. Frecuencia de uso.....	193
Figura 4.44. Entrega y aprovechamiento del compost generado en el SCD.....	195
Figura 4.45. Contribuciones del SCD a los ODS.....	203
Figura 4.46. Límites del sistema: Tratamiento de materia orgánica mediante el SCC	212
Figura 4.47. Límites del sistema: Tratamiento de materia orgánica mediante el Compostaje Descentralizado.	213
Figura 4.48. Distribución relativa de impactos de cambio climático por tipo de tratamiento.....	228

Figura 4.49. Impactos Directos, indirectos e impactos evitados	230
Figura 4.50. Análisis de sensibilidad emisiones netas (t CO ₂ e/t FORM)	231
Figura 4.51. Análisis de hotspots y ventajas estructurales.....	234
Figura 4.52. Comparación de emisiones SCC Vs SDC	236
Figura 4.53. Comparación del porcentaje de separación en origen	238
Figura 5.1. Mapa de generación de residuos orgánicos en España.....	248

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Distribución de la población LMR 40

Tabla 3.2. Estimación de residuos orgánicos generados
en cada barrio de LMR.....46

Tabla 3.3. Caracterizaciones de la materia orgánica de LMR 47

Tabla 3.4. Estimación del número de compostadores
necesarios por barrio según distintas metodologías
y número instalado 61

Tabla 3.5. Diseño inicial Vs final de módulos
por área de compostaje 64

Tabla 3.6. Especificaciones técnicas equipos área
de post-procesamiento 74

Tabla 4.1. Descripción de equipos y su uso en los escenarios 107

Tabla 4.2. Variabilidad de materia orgánica manejada
por frecuencia 110

Tabla 4.3. Factores identificados que fomentan la aparición
del riesgo 114

Tabla 4.4. Comparativa de horas-persona anuales requeridas
por actividad y escenario operativo 132

Tabla 4.5. Recursos operativos por escenario 137

Tabla 4.6. Matriz comparativa de escenarios operativos 138

Tabla 4.7. Comparativa de riesgos ergonómicos por tipo
de operación en SDC.....139

Tabla 4.8. Limitaciones técnicas por escenario operativo 140

Tabla 4.9. Consumo eléctrico por equipo área de
post-procesamiento.....143

Tabla 4.10. Modelo de evolución térmica, pH y humedad 155

Tabla 4.11. Tiempo de retención por compostador 157

Tabla 4.12. Aspectos identificados en los transvases.....158

Tabla 4.13. Propiedades fisicoquímicas del compost
obtenido en LMR.....161

Tabla 4.14. Comparación entre los resultados del compost generado en el (SCD) (SCC) 165

Tabla 4.15. Costes de capital asociados a cada uno de los escenarios en estudio.....175

Tabla 4.16. Costes asociados al personal.....177

Tabla 4.17. Comparación del consumo de combustible y costos operativos entre escenarios manuales y mecanizados 179

Tabla 4.18. Diferencias del OPEX por escenario 180

Tabla 4.19. Tiempos operativos anuales y costes de personal por escenario de compostaje 182

Tabla 4.20. Evaluación económica por escenario y retorno del canon 185

Tabla 4.21.Coste por tonelada tratada en los distintos escenarios operativos.....187

Tabla 4.22. Relación de actividades y Usuarios finales del compost producido 196

Tabla 4.23. Relación de usuarios finales del compost producido 197

Tabla 4.24. Indicadores de participación y cohesión social 200

Tabla 4.25. Relación de entradas y salidas de los elementos considerados.....209

Tabla 4.26. Factores de emisión de CH₄ y N₂O en compostaje aeróbico (kg/t FORM) 217

Tabla 4.27. Inventario realizado para el SCC.....220

Tabla 4.28. Inventario realizado para el SDC 222

Tabla 4.29. Resultados expresados en t CO₂ eq por tratamiento del flujo de FORM.....226

Tabla 4.30. Resultados huella de carbono SCD.....233

Tabla 5.1. Comunidades autónomas con potencial de replicabilidad 247

Tabla 5.2. Población que podría beneficiarse y capacidad de materia orgánica que se puede tratar.....249

Tabla 5.3. Modelos de financiación del CAPEX 253

LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

Acrónimo	Significado
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ADEME	Agence de la Transition Écologique (Agencia Francesa de la Transición Ecológica)
AE	Agente Estructurante
ARC	Agencia de Residuos de Cataluña
CAPEX	Gastos de Capital (Capital Expenditure)
CF	Huella de Carbono (Carbon Footprint)
DECOST	Decentralised Composting in Small Towns (Proyecto europeo de compostaje descentralizado)
EU	Unión Europea
FORM	Fracción Orgánica de los Residuos Municipales
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GHG	Gases de Efecto Invernadero (Greenhouse Gases)
GWP100	Potencial de Calentamiento Global a 100 años
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
JRC	Joint Research Centre (Centro Común de Investigación de la Comisión Europea)
LCA	Life Cycle Assessment (Análisis de Ciclo de Vida)
LMR	Les Masies de Roda
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OPEX	Gastos Operativos (Operational Expenditure)
PEMAR	Plan Estatal Marco en Gestión de Residuos
PRI	Periodo de Retorno de la Inversión
SCC	Sistema Centralizado de Compostaje
SDC	Sistema Descentralizado de Compostaje
TIR	Tasa Interna de Retorno
TMB	Tratamiento Mecánico Biológico
VAN	Valor Actual Neto

RESUMEN

El tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (FORM) constituye uno de los principales retos ambientales de la gestión urbana contemporánea. Esta tesis doctoral, titulada *Evaluación ambiental y tecno-económica del compostaje comunitario como vía única de gestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales*, aborda de manera integral la viabilidad técnica, ambiental, económica y social del compostaje comunitario descentralizado como alternativa sostenible frente a los sistemas centralizados de tratamiento de materia orgánica.

El trabajo se desarrolla en el marco del proyecto europeo DECOST y tiene como caso piloto el municipio de Les Masies de Roda (Cataluña), donde se implementó un sistema de compostaje comunitario profesionalizado capaz de gestionar el 100 % de la materia orgánica generada localmente. A partir de este caso, se analizaron distintos escenarios operativos mediante parámetros de desempeño técnico, evaluación ambiental y análisis de viabilidad económica, complementados con estudios sobre la percepción social, la participación ciudadana y la aceptación institucional del modelo.

Desde la perspectiva metodológica, la investigación adopta un enfoque de análisis tecnoeconómico para evaluar la viabilidad integral del sistema. Esta metodología permite integrar de forma estructurada variables como la factibilidad técnica, los costes de inversión y operación, y la proyección de retornos económicos a lo largo del tiempo, proporcionando una visión holística de su desempeño financiero. De manera complementaria, se aplica la evaluación del ciclo de vida (LCA) para cuantificar las emisiones asociadas y estimar la huella de carbono (Carbon Footprint, CF) del sistema. En este contexto, la CF se considera uno de los indicadores más reconocidos para evaluar el Potencial de Calentamiento Global (GWP100), siendo fundamental para comparar el comportamiento ambiental entre los sistemas centralizado y descentralizado.

La metodología contempla tres dimensiones complementarias:

- 1) Ambiental, centrada en la estabilidad del compost, la huella de carbono y los beneficios asociados a la gestión local de la materia orgánica;

- 2) Tecno económico-financiera, enfocada en el análisis de OPEX, CAPEX, valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y retorno del canon; y
- 3) Social, orientada a evaluar la participación ciudadana, la generación de empleo verde y el grado de aceptación comunitaria.

El análisis comparativo evidencia que el sistema descentralizado presenta un comportamiento ambiental más favorable, registrando emisiones netas de gases de efecto invernadero sensiblemente inferiores a las del sistema centralizado convencional (aproximadamente 120 kg CO₂-eq/t FORM frente a 230 kg CO₂-eq/t FORM). Esta diferencia se explica principalmente por la eliminación del transporte de residuos, la reducción del consumo energético y la valorización agronómica in situ del compost. Desde la perspectiva económica, el sistema muestra un coste operativo inferior (168 €/t frente a 189 €/t) y alcanza el equilibrio financiero en torno a los siete años, gracias al retorno del canon catalán de residuos. En términos sociales, se constata una alta aceptación ciudadana (94 %), así como efectos positivos en la cohesión comunitaria, la equidad de género y la creación de empleo verde.

A partir de la validación empírica del modelo en Les Masies de Roda, la tesis formula un marco estructural para la implantación del compostaje descentralizado, sustentado en tres pilares:

- Condiciones tecnológicas: Infraestructuras modulares de baja complejidad y soporte técnico estable.
- Condiciones institucionales: Liderazgo municipal, cofinanciación pública y articulación normativa y
- Condiciones sociales: Corresponsabilidad y participación de la comunidad.

El análisis geoespacial y comparativo permite estimar un potencial de replicabilidad de 211.000 t/año de FORM en municipios españoles de menos de 1.500 habitantes, lo que podría evitar hasta 28.000 t CO₂-eq/año. En el ámbito europeo, cerca del 13 % de la población rural podría beneficiarse de sistemas equivalentes, consolidando el compostaje comunitario como una solución estratégica para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11, 12, 13 y 15).

La investigación aborda asimismo la viabilidad financiera del modelo, considerando los marcos normativos e instrumentos fiscales vigentes en Cataluña y los esquemas de financiación adaptados a la escala municipal. En este contexto, el retorno del canon por disposición de residuos se configura como el mecanismo más eficaz y estructural para sostener estos sistemas. No obstante, el diseño del PINFRECAT 2025-2035, actualmente en proceso participativo, abre la posibilidad de incorporar instrumentos de apoyo financiero específicos para infraestructuras descentralizadas de tratamiento de materia orgánica, especialmente si se alinean con los objetivos de economía circular, descarbonización y proximidad. La inclusión de estos mecanismos reforzaría el papel del compostaje comunitario como tecnología estructural dentro de la planificación catalana de residuos.

Las conclusiones confirman que el compostaje comunitario descentralizado constituye una vía estructuralmente viable para la gestión local de la materia orgánica, particularmente en municipios de menos de 1.500 habitantes con generación inferior a 150 t/año. Su carácter modular, bajo en emisiones y de alto valor social lo sitúa como un modelo alineado con los principios de proximidad, economía circular y resiliencia territorial promovidos por la Unión Europea.

Finalmente, la tesis propone líneas futuras de investigación orientadas a:

- a) el desarrollo de nuevos prototipos de compostadores y vehículos de apoyo con capacidades de monitoreo y registro de datos; y
- b) la consolidación de un censo nacional de instalaciones descentralizadas, que permita caracterizar la infraestructura existente, evaluar su rendimiento técnico y ambiental, y orientar la planificación pública hacia modelos de gestión más circulares y sostenibles.

ABSTRACT

The treatment of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) represents one of the main environmental challenges in contemporary urban management. This doctoral dissertation, entitled *Environmental and Techno-Economic Assessment of Community Composting as a Singular Pathway for the Management of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste*, comprehensively addresses the technical, environmental, economic, and social feasibility of decentralized community composting as a sustainable alternative to centralized organic waste treatment systems.

The research was conducted within the framework of the European project DECOST and takes as its pilot case the municipality of Les Masies de Roda (Catalonia), where a professionalized community composting system was implemented, capable of managing 100 % of the locally generated organic waste. Based on this case study, various operational scenarios were analyzed using technical performance parameters, environmental assessment, and economic viability analysis, complemented by studies on social perception, citizen participation, and institutional acceptance of the model.

From a methodological standpoint, the study adopts a techno-economic analytical approach to evaluate the integrated feasibility of the system. This methodology enables the structured integration of variables such as technical feasibility, investment and operational costs, and projected financial returns over time, thereby providing a holistic view of the system's economic performance. In parallel, Life Cycle Assessment (LCA) is applied to quantify associated emissions and estimate the carbon footprint (CF) of the system. CF is considered one of the most recognized indicators for assessing Global Warming Potential (GWP100) and thus becomes essential for comparing the environmental performance of centralized and decentralized composting systems.

The methodology encompasses three complementary dimensions:

- 1) Environmental, focused on compost stability, carbon footprint, and the benefits derived from local management of organic matter.
- 2) Techno-economic and financial, addressing operational and investment costs (OPEX, CAPEX), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and fiscal return mechanisms; and

- 3) Social, oriented toward evaluating citizen participation, green job creation, and community acceptance.

The comparative analysis shows that the decentralized system exhibits a more favorable environmental performance, with net greenhouse gas emissions significantly lower than those of the conventional centralized model (approximately 120 kg CO₂-eq/t OFMSW compared to 230 kg CO₂-eq/t). This difference is mainly due to the elimination of waste transport, reduced energy consumption, and the in situ agronomic valorization of the compost produced.

From an economic perspective, the decentralized system demonstrates a lower operational cost (168 €/t vs. 189 €/t) and achieves financial equilibrium within approximately seven years, largely due to the Catalan waste canon return. Socially, the model shows a high level of citizen acceptance (94 %) and generates positive impacts in community cohesion, gender equity, and green employment creation.

Based on the empirical validation of the model in Les Masies de Roda, the thesis formulates a structural framework for the implementation of decentralized composting, built on three core pillars:

- Technological conditions – modular, low-complexity infrastructures supported by stable technical assistance.
- Institutional conditions – municipal leadership, public co-financing, and regulatory integration; and
- Social conditions – shared responsibility and active community participation.

The geospatial and comparative analysis estimates a replicability potential of 211,000 t/year of OFMSW in Spanish municipalities with fewer than 1,500 inhabitants, potentially avoiding up to 28,000 t CO₂-eq/year. At the European level, approximately 13 % of the rural population could benefit from equivalent systems, positioning community composting as a strategic solution for achieving Sustainable Development Goals (SDGs) 11, 12, 13, and 15.

The research also examines the financial feasibility of the model within the existing regulatory and fiscal frameworks in Catalonia, as well as financing mechanisms tailored to the municipal scale. In this context, the canon return emerges as the

most effective and structural mechanism for sustaining these systems. Furthermore, the design of the PINFRECAT 2025–2035, currently under participatory review, introduces the possibility of incorporating targeted financial instruments to support decentralized organic waste treatment infrastructures, particularly when aligned with the principles of circular economy, decarbonization, and territorial proximity. The inclusion of such mechanisms would reinforce the role of community composting as a structural technology within Catalonia's waste management planning framework.

The findings confirm that decentralized community composting constitutes a structurally viable pathway for local organic waste management, particularly in municipalities with fewer than 1,500 inhabitants and an annual generation below 150 t. Its modular configuration, low emissions, and high social value position as a model aligned with the principles of proximity, circular economy, and territorial resilience promoted by the European Union.

Finally, the thesis outlines future research lines aimed at:

- a) developing new prototypes of composting units and support vehicles equipped with data monitoring and recording systems; and
- b) establishing a national registry of decentralized composting facilities, to characterize existing infrastructures, assess their technical and environmental performance, and guide public planning toward more circular and sustainable management models.

RESUM

El tractament de la fracció orgànica dels residus sòlids municipals (FORM) constitueix un dels principals reptes ambientals de la gestió urbana contemporània. Aquesta tesi doctoral, titulada *Avaluació ambiental i tecnoeconòmica del compostatge comunitari com a via única de gestió de la fracció orgànica dels residus sòlids municipals*, aborda de manera integral la viabilitat tècnica, ambiental, econòmica i social del compostatge comunitari descentralitzat com a alternativa sostenible als sistemes centralitzats de tractament de la matèria orgànica.

El treball s'emmarca dins el projecte europeu DECOST i pren com a cas pilot el municipi de Les Masies de Roda (Catalunya), on es va implementar un sistema de compostatge comunitari professionalitzat capaç de gestionar el 100 % de la matèria orgànica generada localment. A partir d'aquest cas d'estudi, s'han analitzat diversos escenaris operatius mitjançant paràmetres de rendiment tècnic, avaluació ambiental i anàlisi de viabilitat econòmica, complementats amb estudis sobre la percepció social, la participació ciutadana i l'acceptació institucional del model.

Des d'una perspectiva metodològica, la recerca adopta un enfocament d'anàlisi tecnoeconòmica per avaluar la viabilitat integral del sistema. Aquesta metodologia permet integrar de manera estructurada variables com la factibilitat tècnica, els costos d'inversió i d'operació, i la projecció de retorns econòmics al llarg del temps, proporcionant una visió holística del seu comportament financer. Paral·lelament, s'aplica l'Avaluació del Cicle de Vida (ACV) per quantificar les emissions associades i estimar la petjada de carboni (Carbon Footprint, CF) del sistema. La CF es considera un dels indicadors més reconeguts per avaluar el Potencial d'Escalfament Global (GWP100) i és fonamental per comparar el comportament ambiental entre els sistemes centralitzat i descentralitzat.

La metodologia contempla tres dimensions complementàries:

- 1) Ambiental, centrada en l'estabilitat del compost, la petjada de carboni i els beneficis associats a la gestió local de la matèria orgànica;

- 2) Tecnoeconòmica i financera, enfocada en l'anàlisi dels costos d'operació i inversió (OPEX, CAPEX), el valor actual net (VAN), la taxa interna de retorn (TIR) i el retorn del cànon; i
- 3) Social, orientada a avaluar la participació ciutadana, la generació d'ocupació verda i el grau d'acceptació comunitària.

L'anàlisi comparativa evidencia que el sistema descentralitzat presenta un comportament ambiental més favorable, amb emissions netes de gasos amb efecte d'hivernacle significativament inferiors a les del sistema centralitzat convencional (aproximadament 120 kg CO₂-eq/t FORM davant 230 kg CO₂-eq/t). Aquesta diferència s'explica principalment per l'eliminació del transport de residus, la reducció del consum energètic i la valorització agronòmica in situ del compost produït.

Des de la perspectiva econòmica, el sistema mostra un cost operatiu inferior (168 €/t enfront de 189 €/t) i assoleix l'equilibri financer en aproximadament set anys, gràcies al retorn del cànon català de residus. En termes socials, s'hi constata una elevada acceptació ciutadana (94 %), així com efectes positius en la cohesió comunitària, la igualtat de gènere i la creació d'ocupació verda.

A partir de la validació empírica del model a Les Masies de Roda, la tesi formula un marc estructural per a la implantació del compostatge descentralitzat, sustentat en tres pilars fonamentals:

- Condicions tecnològiques —infraestructures modulars de baixa complexitat i suport tècnic estable—;
- Condicions institucionals —lideratge municipal, cofinançament públic i articulació normativa—; i
- Condicions socials —corresponsabilitat i participació activa de la comunitat—.

L'anàlisi geoespacial i comparativa permet estimar un potencial de replicabilitat de 211.000 t/any de FORM en municipis espanyols de menys de 1.500 habitants, fet que podria evitar fins a 28.000 t CO₂-eq/any. A escala europea, prop del 13 % de la població rural podria beneficiar-se de sistemes equivalents, consolidant el compostatge comunitari com una solució estratègica per al compliment dels Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) 11, 12, 13 i 15.

La recerca també analitza la viabilitat financera del model, considerant els marcs normatius i fiscals vigents a Catalunya, així com els esquemes de finançament adaptats a l'escala municipal. En aquest context, el retorn del cànon per disposició de residus es configura com el mecanisme més eficaç i estructural per sostenir aquests sistemes. Tanmateix, el disseny del PINFRECAT 2025–2035, actualment en procés participatiu, obre la possibilitat d'incorporar instruments específics de suport financer per a infraestructures descentralitzades de tractament de matèria orgànica, especialment si s'alineen amb els objectius d'economia circular, descarbonització i proximitat. La inclusió d'aquests mecanismes reforçaria el paper del compostatge comunitari com a tecnologia estructural dins de la planificació catalana de residus.

Les conclusions confirmen que el compostatge comunitari descentralitzat constitueix una via estructuralment viable per a la gestió local de la matèria orgànica, especialment en municipis de menys de 1 500 habitants i amb una generació inferior a 150 t/any. El seu caràcter modular, les seves baixes emissions i l'elevat valor social el situen com un model alineat amb els principis de proximitat, economia circular i resiliència territorial promoguts per la Unió Europea.

Finalment, la tesi proposa línies futures de recerca orientades a:

- a) desenvolupar nous prototips de compostadors i vehicles de suport amb capacitats de monitoratge i registre de dades; i
- b) consolidar un cens estatal d'instal·lacions descentralitzades, que permeti caracteritzar la infraestructura existent, avaluar-ne el rendiment tècnic i ambiental, i orientar la planificació pública cap a models de gestió més circulars i sostenibles.

PREFACIO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Este capítulo establece el marco general del problema de investigación, presentando el contexto global de la gestión de residuos en relación con los retos de crecimiento poblacional, urbanización y cambio climático. Se abordan las limitaciones del modelo lineal de producción y se introduce el paradigma de la economía circular como enfoque transformador, haciendo especial énfasis en la valorización de la fracción orgánica de los residuos municipales. Asimismo, se revisa el marco normativo internacional, europeo, español y catalán, destacando la evolución hacia estrategias de prevención, reciclaje en origen y descentralización del tratamiento de biorresiduos. Finalmente, se contextualiza el proyecto DECOST y se identifican brechas en el conocimiento sobre la viabilidad integral del compostaje descentralizado, justificando la necesidad del presente estudio.

CAPÍTULO II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

En este apartado se formula la hipótesis principal: Que el compostaje comunitario descentralizado constituye una solución tecnológica sostenible desde las dimensiones económica, ambiental y social, capaz de gestionar el 100 % de la materia orgánica generada en municipios de pequeña escala como Les Masies de Roda. A partir de esta hipótesis, se define un objetivo general orientado a evaluar dicha viabilidad, así como tres objetivos específicos: (1) rediseñar y optimizar el proceso de compostaje descentralizado con gestión profesionalizada; (2) evaluar su desempeño integral mediante indicadores ambientales, económicos y sociales; y (3) desarrollar un marco general de aplicación del modelo como única vía de tratamiento de la fracción orgánica, incluyendo su uso agrícola local.

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo detalla la metodología aplicada para diseñar, implementar y evaluar el sistema de compostaje comunitario descentralizado en Les Masies de Roda. Se describe

en profundidad el contexto físico, social, económico y ambiental del municipio, así como su sistema anterior de gestión de residuos. A partir de este diagnóstico, se presentan los criterios técnicos y normativos que guiaron el diseño del nuevo modelo, incluyendo el dimensionamiento de las áreas de compostaje, los escenarios operativos, la distribución geográfica de los módulos y la infraestructura de post-procesamiento. La evaluación se estructura en tres dimensiones: técnica-ambiental (análisis fisicoquímicos, prueba respirométrica, emisiones y huella de carbono), económico-financiera (cálculo de OPEX, VAN, TIR y retorno del canon), y social (campañas de sensibilización, encuestas de percepción y grado de satisfacción ciudadana).

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Objetivo: Presentar y analizar los resultados obtenidos a partir de la implementación y evaluación del modelo de compostaje comunitario descentralizado en Les Masies de Roda (LMR), considerando tres dimensiones clave: técnica, económico-social y ambiental.

Sección I. Resultados técnico-operativos

Esta sección describe el desempeño del sistema descentralizado (SDC) en términos de operatividad, eficiencia del proceso y calidad del compost. Se analizan los cinco escenarios implementados —con especial énfasis en el escenario 3A (profesionalizado con maquinaria)— en base a indicadores como el número de compostadores utilizados, volumen de residuos tratados, horas de trabajo requeridas y esfuerzo físico. Se constata que el escenario 3A optimiza significativamente el uso de recursos y reduce la carga operativa sin comprometer la calidad del compost, alcanzando una estabilidad adecuada y contenidos de nutrientes que cumplen los parámetros normativos. Asimismo, se evidencia que el sistema es capaz de gestionar el 100 % de la materia orgánica generada en el municipio, con una tasa de recuperación del 92,6 %, validando así su viabilidad técnica como vía única de tratamiento.

Sección II. Resultados económico-sociales

Aquí se presenta un análisis detallado de los costos operativos (OPEX) del sistema descentralizado frente al sistema centralizado (SCC), junto con escenarios de retorno

del canon de residuos, inversión inicial (CAPEX) y análisis de rentabilidad financiera (VAN, TIR, PRI). Se muestra que el escenario 3A es económicamente competitivo, especialmente cuando se proyecta la devolución parcial o total del canon por parte de la administración. Desde el punto de vista social, se destacan los beneficios en términos de creación de empleo local, generación de conocimiento, fomento de la economía circular y mejora en la percepción ciudadana del servicio de residuos. Las encuestas aplicadas reflejan un elevado nivel de satisfacción vecinal (81 %) y un fuerte respaldo a la continuidad del modelo, lo que confirma su aceptación social y potencial de réplica en contextos similares.

Sección III. Resultados ambientales

En esta sección se aplican El análisis ambiental, realizado mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y expresado en términos de Potencial de Calentamiento Global (GWP100), comparó el desempeño climático de dos modelos de gestión de la fracción orgánica municipal (FORM): el sistema centralizado (SCC) y el sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC).

El SCC presentó un impacto neto de 0,23 t CO₂ eq/t FORM, asociado principalmente a las emisiones directas del proceso biológico y a los consumos energéticos e impactos del transporte, identificándose el vertedero como el principal punto crítico (hotspot).

El SDC mostró un balance neto de 0,12 t CO₂ eq/t FORM, aproximadamente un 50 % menor, debido a la reducción de consumos energéticos y de transporte, así como a los beneficios evitados por la sustitución parcial de fertilizantes minerales mediante el uso del compost.

No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que el estudio se apoya principalmente en datos secundarios y supuestos representativos. Además, la literatura científica advierte que los sistemas descentralizados pueden generar emisiones superiores a las de los centralizados cuando no cuentan con un control adecuado de las condiciones de aireación, humedad y manejo del nitrógeno. En este sentido, el compostaje descentralizado se presenta como una alternativa con potencial climático favorable, siempre que se diseñe y opere bajo criterios técnicos apropiados que garanticen su desempeño ambiental. En este sentido, el compostaje descentralizado se presenta como una alternativa con potencial climático favorable,

siempre que se diseñe y opere bajo criterios técnicos apropiados que garanticen su desempeño ambiental

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN GENERAL

A partir de la experiencia piloto desarrollada en Les Masies de Roda, se reflexiona sobre la viabilidad estructural del compostaje comunitario descentralizado como estrategia de tratamiento integral de la fracción orgánica de los residuos municipales, evaluando su potencial de replicabilidad y escalabilidad en diferentes contextos territoriales.

La discusión se orienta a contextualizar los hallazgos dentro del marco europeo y catalán de economía circular, analizando los factores operativos, institucionales y sociales que determinan el éxito del modelo. Asimismo, se identifican los límites y oportunidades del compostaje descentralizado en función del tamaño municipal, la capacidad de gestión local y la disponibilidad de instrumentos financieros estables. Este capítulo, por tanto, no solo sintetiza las principales evidencias del estudio, sino que las interpreta como base para proponer un marco estructural que consolide el compostaje comunitario descentralizado como tecnología clave de transición ecológica y resiliencia territorial.

CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

El presente capítulo sintetiza los principales resultados de la investigación, validando la hipótesis central de que el compostaje comunitario descentralizado constituye una vía técnica, económica, ambiental y socialmente viable para la gestión integral de la fracción orgánica en municipios de pequeña escala.

En primer lugar, se presentan las conclusiones generales, que integran los aprendizajes derivados del caso de estudio y de la comparación con experiencias internacionales. Posteriormente, se formulan recomendaciones prácticas dirigidas a administraciones y gestores locales, orientadas a fortalecer la replicabilidad y consolidación del modelo. Finalmente, se proponen líneas de investigación futura enfocadas en el desarrollo tecnológico, la profesionalización operativa y la creación de marcos institucionales que faciliten la expansión del compostaje descentralizado como componente estructural de la economía circular.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO GLOBAL Y GENERAL

El marco regulatorio actual para la gestión de residuos municipales a nivel mundial surge como respuesta al crecimiento poblacional inminente, desencadenando una serie de problemáticas interrelacionadas. Según las Naciones Unidas (Banco Mundial, 2018), se proyecta que para el año 2050 la población global alcance los 9.100 millones de personas. Este aumento poblacional conlleva un incremento en los niveles de consumo, lo que ejerce una mayor presión sobre los recursos naturales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). Esto a su vez resulta en un aumento en la generación de residuos, así como en la demanda de materias primas, fuentes de energía y materiales, en un contexto donde estos recursos son cada vez más escasos. La escasez actual de recursos radica en el modelo económico lineal de producción de bienes y servicios bajo la premisa de ‘extraer, producir y desechar’, lo que conlleva la pérdida de recursos finitos, impactos ambientales significativos y el aumento en los precios de las materias primas y fuentes de energía (Ellen MacArthur Foundation, 2021). La economía actual se basa en tomar los materiales naturales de la tierra, transformándolos en productos que se integran en la cadena de consumo y convertidos finalmente en residuos cuyo destino era fundamentalmente los vertederos (Ellen MacArthur Foundation, 2021). Este modelo lineal se ha sustentado desde la revolución industrial, generando numerosos problemas medio ambientales, comprometiendo la capacidad de asimilación de los recursos aire, agua y suelo, generando episodios de contaminación (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). Más de 2 billones de toneladas de Residuos Sólidos municipales (RSM) son generadas actualmente en el mundo y en el año 2050, se calcula que esta cifra ascenderá a 3.5 billones de toneladas (Yatoo *et al.*, 2024). El crecimiento de la población y la urbanización son las principales causas del aumento de los residuos sólidos producidos en el tiempo (Rao & Parsai, 2023).

A nivel mundial, la composición de los residuos sólidos municipales varía según el nivel de ingresos. A medida que aumenta el nivel de la renta (países desarrollados), el porcentaje de materia orgánica disminuye y las fracciones reciclables tales como papel y plástico aumentan en comparación de países de renta baja (países en desarrollo). Esto quiere decir que la fracción de materia orgánica generada en los residuos municipales es de alrededor del 32 % para países desarrollados y entre el 53 % y 56 % en países en vía de desarrollo (Banco Mundial 2018).

De igual forma la gestión de estos residuos difiere del nivel de desarrollo. Se estima que, en países con un alto nivel de ingresos, cerca del 2 % de los residuos es dispuesto en rellenos sanitarios, mientras que en países de bajos ingresos, cerca del 93 % de los RSM generados son quemados o terminan en el relleno sanitario sin ningún tipo de control (Yatoo *et al.*, 2024).

La descomposición de la materia orgánica sin ningún tipo de tratamiento genera gases de efecto invernadero como CO₂ y CH₄, causando impactos como el calentamiento global, además de la liberación de calor, malos olores y microorganismos patógenos, entre otros aspectos ambientales. Es por esta razón que, a nivel mundial, mediante leyes ambientales se busca evitar la inadecuada gestión de los residuos orgánicos y fomentar tecnologías termoquímicas y biológicas como incineración, pirolisis, licuefacción, gasificación, digestión anaerobia y compostaje. (Yatoo *et al.*, 2024).

1.2. MARCO TÉCNICO Y LEGAL EN LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS MUNICIPALES EN EL MUNDO, EUROPA, ESPAÑA Y CATALUÑA

El contexto anterior ha dado lugar a la firma de acuerdos internacionales históricos, como el Protocolo de Kioto (UNFCCC, 1998), el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2015), la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y la Declaración Ministerial de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (United Nations, 2015). Introduciendo acciones y la aplicación de conceptos como el de la economía circular, en lugar de permitir que los materiales valiosos se desperdicien y los sistemas naturales se degraden, aplicando tres principios: Eliminar los residuos y la contaminación, hacer circular productos y materiales, y regenerar la naturaleza. La incorporación gradual de la economía circular en los procesos de producción está transformando la forma de gestionar los residuos orgánicos, que

ahora comienzan a considerarse como un recurso aprovechable. Por ello, se aconseja priorizar tecnologías de valorización en lugar de métodos tradicionales como el vertido o la incineración, ya que estas tecnologías facilitan la recuperación de componentes útiles que pueden reintegrarse en el ciclo productivo, especialmente en aplicaciones agrícolas (Álvarez-Alonso *et al.*, 2024). A partir del año 2022, la Unión Europea (UE) propuso el Plan de acción de economía circular. Este documento se encuentra en línea con el objetivo de Neutralidad climática para la UE para el 2050 y el Pacto Verde (European Commission, 2020).

La UE ocupa el cuarto lugar como mayor emisor de gases de efecto invernadero, después de China, Estados Unidos y la India. Los principales sectores a los que se les atribuyen estas emisiones son: Energía (77,01 %), agricultura (10,55 %), Industria (9,10 %) y residuos (3,32 %). Los principales emisores fueron: Alemania, Francia, Italia, Polonia y España.

Con el fin de afrontar esta situación, el Parlamento Europeo aprobó la Ley Europea del Clima mediante el Reglamento (UE) 2021/1119. Esta normativa establece el marco para que la Unión Europea (UE) alcance la neutralidad climática en 2050 y fija como objetivo vinculante la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % para 2030, frente al 40 % previamente establecido. Como parte de este marco, la Ley incorpora el Pacto Verde Europeo (Parlamento Europeo, 2024), cuyos objetivos se operacionalizan a través del paquete legislativo «Objetivo 55». En el ámbito de los residuos, las actuaciones asociadas se desarrollan en el Plan de Acción de Economía Circular, que plantea un marco político más exigente orientado a la prevención, la mejora de la gestión y el impulso de la circularidad de los materiales (European Commission, 2020).

Dentro de este marco político se encuentra la normativa 2008/1998/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la EU, 2008) y la 2018/851. La primera establece un marco jurídico de tratamiento de residuos de la Unión Europea, enfatizando en la importancia de utilizar técnicas adecuadas de gestión, recuperación y reciclado de residuos para reducir la presión sobre los recursos y mejorar su uso. Estableciendo una jerarquía de residuos: Prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización para otros fines y eliminación. En cuanto a la normativa 2018/851 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018), actualiza la norma

2008/1998 incluyendo nuevas definiciones y renovando los objetivos hacia una economía circular en materia de preparación para la reutilización y de reciclado de los residuos, a fin de que reflejen mejor la ambición de la Unión de avanzar hacia una economía circular:

- Para 2025, tiene que reciclarse un mínimo del 55 % de los residuos municipales en peso. Este objetivo ascenderá al 60 % para 2030 y al 65 % para 2035.
- Los Estados miembros deben garantizar que, a más tardar el 31 de diciembre de 2023, los biorresiduos se recojan de forma separada o se reciclen en origen (por ejemplo, mediante compostaje).
- De acuerdo con la Directiva sobre vertederos de la UE, los Estados miembros deben reducir la cantidad de residuos municipales enviados a vertederos al 10 % o menos de la cantidad total de residuos municipales generados para 2035.

Otro aspecto nuevo de la Directiva europea 2018/851 es el compromiso con el «Principio de Proximidad», el cual se encuentra orientado a que los residuos deben reciclarse lo más cerca posible de la fuente de generación, evitando los costes de recogida y transporte y sus impactos ambientales asociados (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018). De acuerdo con la Directiva 2008/98/CE, los biorresiduos comprenden los residuos biodegradables de jardines y parques, así como los residuos alimentarios y de cocina generados en hogares, comercios, servicios de restauración y actividades similares de la industria alimentaria. Esta caracterización normativa enfatiza su origen distribuido y de pequeña escala, lo que favorece su gestión próxima al punto de generación. De esta forma, se promueve el tratamiento de los biorresiduos a nivel local o regional a través del compostaje descentralizado, en contraste con los esquemas de tratamiento centralizado a gran escala, como el compostaje industrial (Alves *et al.*, 2024). Así mismo en materia de residuos orgánicos, establece su definición como biorresiduos: Residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimentarios y de cocina procedentes de hogares, oficinas, restaurantes, mayoristas, comedores, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos.

Adicionalmente, el artículo 22 (Directiva Europea 2018/851), establece que estos residuos se separen y reciclen en origen, o bien se recojan de forma separada y no se mezclen con otros tipos de residuos. Incentivando el reciclado de estos residuos mediante «el compostaje y la digestión, de los biorresiduos de una forma que asegure un elevado nivel de protección medioambiental y genere un resultado que cumpla las normas de alta calidad», además de «Fomentar el uso de materiales producidos a partir de biorresiduos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018).

Finalmente, esta ley (Directiva Europea 2018/851) se ha diseñado para crear instrumentos económicos que promuevan el aprovechamiento de residuos y desincentiven su disposición en rellenos sanitarios. Estos instrumentos incluyen medidas regulatorias e incentivos económicos, dirigidos a las autoridades regionales y locales, con el objetivo de fomentar la prevención de residuos y fortalecer los sistemas de recolección separada, evitando el apoyo a prácticas como el depósito en vertederos y la incineración.

1.2.1. España

En línea con la normativa europea, la gestión de residuos en España se rige por la Ley 7/2022 (Jefatura del Estado «BOE» núm. 85, 2022) de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular y el Plan estatal marco en gestión de residuos (PEMAR) 2023-2035, (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2023) el cual pretende ser un instrumento para orientar la política de residuos en España con el fin de mejorar las deficiencias detectadas y promover acciones que generen un mejor resultado ambiental y que aseguren la consecución de los objetivos legales. En relación con los residuos domésticos las medidas se enfocan en una estrategia de reducción de vertido de residuos biodegradables, en dos ámbitos importantes:

- 1) La recogida separada de los biorresiduos en donde establece la obligatoriedad de recoger de forma separada nuevas fracciones de residuos a partir del 30 de junio de 2022 en entidades locales con población de más de 5.000 habitantes, y a partir de 2024 para el resto de las entidades locales.
- 2) La implantación del reciclado en origen de estos mediante el compostaje doméstico y comunitario, digestión anaerobia, o combinación de ambas, sin que se mezclen con otros residuos a lo largo de su tratamiento.

1.2.2. Cataluña

La normativa de residuos en Cataluña sigue la misma línea europea y española en cuanto a la jerarquía establecida en prevención de la generación de los residuos, preparación para la reutilización y su reciclaje o aprovechamiento de material, a los que siguen otros tipos de valorizaciones, y, finalmente, la disposición o eliminación segura cuando el resto de las opciones no han sido posibles.

La gestión de residuos en Cataluña se describe de manera práctica en el documento Programa General de prevención y de gestión de residuos y recursos de Cataluña 2020 (PRECAT) (Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat & Agència de Residus de Catalunya, 2020). El PRECAT agrupa el planteamiento de programas específicos los cuales son evaluados desde el grado de consecución de los objetivos fijados y así identificar y revisar necesidades con vistas al nuevo período de planificación.

Adicionalmente Cataluña establece su planificación en la gestión de residuos mediante tres programas independientes, diferenciados en función del origen: el Programa de gestión de los residuos municipales de Cataluña (PROGREMIC), el Programa de gestión de los residuos industriales de Cataluña (PROGRIC) y el Programa de gestión de los residuos de la construcción en Cataluña (PROGROC).

De otra parte, la Agencia de Residuos de Cataluña ha puesto en marcha medidas económicas, financieras y fiscales para fomentar la gestión de residuos, reforzar los mercados del reciclaje y reducir las presiones ambientales. Una herramienta clave es el canon por disposición final en vertederos o incineración, que desincentiva las prácticas de mayor impacto ambiental al incrementar sus costos (Freire-González *et al.*, 2022; Llei 5/2020, 2020; Pla territorial sectorial d'infraestructures de gestió de residus municipals de Catalunya 2013–2020 [PINFRECAT20], 2020).

De otra parte, se impone el retorno del canon, un instrumento que fomenta la valorización material de los residuos y que se utiliza para financiar infraestructuras de gestión de residuos municipales que favorezcan este tipo de procesos de valorización, como es el caso de la materia orgánica. (Fundació ENT, 2024). Para el cálculo de estos valores, la Junta de Gobierno de la Gerencia de Residuos establece anualmente una Guía de orientación a las entidades locales sobre la aplicación de la devolución del canon sobre la eliminación de residuos municipales de rechazo (ARC, 2022).

1.3. GENERACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS MUNICIPALES EN ESPAÑA

En España se generan aproximadamente 23 millones de toneladas (Mt) de residuos municipales al año, de las cuales 17,8 Mt (77 %) corresponden a residuos mezclados y 5,2 Mt (23 %) se recogen selectivamente (INE, 2024). La generación per cápita alcanza 1,3 kg/hab/día. El país cuenta con 11 plantas industriales de valorización de residuos mezclados y 182 vertederos autorizados. No obstante, solo el 30 % del total de residuos se recicla, mientras que el 57 % se destina a vertedero y el 14 % se somete a incineración. En cuanto a la generación de gases de efecto invernadero (GEI), aunque el sector residuos aporta una proporción relativamente reducida del total nacional (aproximadamente un 5 %), constituye un área prioritaria de actuación. Esto se debe a que el 72 % de las emisiones asociadas al sector proviene de la disposición de residuos biodegradables en vertedero (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, 2023). En relación con la composición, aproximadamente el 32 % de los residuos municipales corresponde a materia orgánica, lo que equivale a 6,5 Mt/año (Banco Mundial, 2018). De esta cantidad, el 18 % se recoge selectivamente, mientras que el 82 % permanece en los residuos mezclados. Esta fracción se destina principalmente al compostaje y la biometanización en plantas centralizadas, y en menor medida a sistemas descentralizados o comunitarios. El resto se elimina en vertedero o mediante incineración (MITECO, 2021).

Las comunidades autónomas disponen de instalaciones de tratamiento mecánico-biológico (TMB) y plantas de biometanización que permiten recuperar materia orgánica tanto de los residuos mixtos como de los recogidos selectivamente. De las 6,5 Mt/año de materia orgánica generadas, se valorizan alrededor de 5 Mt/año, distribuidas de la siguiente forma: 0,4 % mediante compostaje doméstico y comunitario, y 76 % a través de digestión anaerobia y compostaje, lo que supone una tasa de valorización global del 77 % (MITECO, 2021).

El compostaje es un proceso biológico de degradación oxidativa de la materia orgánica bajo condiciones aerobias controladas. Cuando se aplica correctamente, produce una enmienda orgánica o compost maduro, estable y humificado, con bajo contenido de patógenos y apto para uso agrícola sin riesgos ambientales (Álvarez-Alonso *et al.*, 2024). Durante 2023, se obtuvieron en España cerca de 300.000 t/

año de compost, evitando aproximadamente 350.000 t de CO₂ eq (Generalitat de Catalunya, 2024).

Las instalaciones TMB tienen como objetivo reducir la cantidad de residuos destinados a eliminación y mejorar sus características para cumplir con la normativa europea. Estas plantas combinan un proceso mecánico, destinado a la separación de materiales reciclables y materia orgánica, con un proceso biológico de estabilización. En la fase mecánica se emplean sistemas automatizados de triaje —cribas rotativas, separadores magnéticos y balísticos, clasificadores ópticos e inductivos— que extraen materiales valorizables. La fracción orgánica recuperada se somete luego a pretratamiento (hidrociclones y trampas de arena) para eliminar impropios y posteriormente a digestión anaerobia, donde se genera biogás rico en metano y un digestato que puede estabilizarse como enmienda orgánica (AMB, 2024).

A pesar de estos avances, la eficiencia global del proceso sigue siendo limitada: solo un 4,7 % de la materia orgánica contenida en los residuos mixtos se recupera como material bioestabilizado, utilizado principalmente en vertederos o taludes, sin alcanzar la calidad requerida para considerarse compost (Generalitat de Catalunya, Departament d'Acció Climàtica, 2024).

1.3.1. Generación y gestión de los residuos municipales en Cataluña

En Cataluña, la generación per cápita en 2023 fue de 1,3 kg/hab/día, con un total de 3,7 Mt de residuos municipales generados, un 1,7 % menos respecto a 2022 (ARC, 2023). De los 947 municipios existentes, 370 han implantado modelos de recogida eficientes (puerta a puerta o contenedores cerrados), mientras que el 90 % restante mantiene modelos convencionales con contenedores abiertos en vía pública.

Del total de residuos generados, 1,7 Mt (46,7 %) se recogen de forma selectiva. La distribución por fracciones es la siguiente: Materia orgánica (11,6 %), papel/cartón (10,8 %), voluminosos y textil (7,9 %), envases (5,9 %), vidrio (5,3 %), poda (2,9 %), otros residuos (1,2 %) y RAEEs (1,1 %), y finalmente el 53,3 % corresponde a fracción resto (ARC, 2023).

Cataluña dispone de un entramado de infraestructuras de tratamiento integradas que incluyen 31 vertederos, 4 plantas de valorización térmica, 13 plantas TMB, 25

plantas de compostaje y 13 plantas de triaje. Estas instalaciones suelen agruparse en complejos multifuncionales; por ejemplo, la EDAR de Orís integra una planta TMB, una de triaje y una de compostaje junto a un vertedero (PINFRECAT20, 2020).

1.3.2. Marco financiero para la gestión de la fracción orgánica en Cataluña

El sistema financiero catalán en materia de residuos se basa en dos instrumentos principales: el canon y el retorno del canon (Llei 17/2022). El canon busca desincentivar las opciones de disposición final ambientalmente inadecuadas, mientras que el retorno del canon promueve la valorización y el reciclaje, financiando infraestructuras y mejoras en la gestión municipal.

Según la Guía de orientación para los entes locales (ARC, 2019), al menos el 50 % de los fondos recaudados debe destinarse al tratamiento de la fracción orgánica recogida selectivamente, incluyendo acciones para mejorar la calidad de la fracción resto. Los conceptos financiables incluyen:

- tratamiento de la fracción orgánica (FORM) y de los rechazos de plantas de tratamiento,
- gestión del bioestabilizado,
- impulso y comercialización del compost,
- recogida selectiva de la FORM,
- gestión de residuos especiales en pequeñas cantidades y
- programas de autocompostaje.

Desde el 1 de enero de 2023, entró en vigor el Impuesto estatal sobre la deposición e incineración de residuos (Ley 7/2022), que grava estas operaciones tanto en instalaciones públicas como privadas. En Cataluña, la (ARC) es responsable de su gestión y recaudación. Este instrumento complementa el canon autonómico, orientando los incentivos hacia la prevención y la valorización material.

1.3.3. Calidad y gestión de la fracción orgánica en Cataluña

La calidad de la materia orgánica recogida selectivamente (FORM) es evaluada mediante caracterizaciones periódicas realizadas por la Agencia de Residuos de

Cataluña. Estas determinan el nivel de impropios, que incide directamente en el cálculo del retorno del canon: a mayor presencia de impropios, menor retorno.

Las plantas de compostaje y biometanización tratan la FORM para obtener un compost estable, maduro y con bajo contenido de patógenos, que puede aplicarse en agricultura sin riesgos ambientales (Álvarez-Alonso *et al.*, 2024).

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA

Los sistemas de tratamiento de la fracción orgánica se dividen en procesos anaeróbicos, como la biometanización (sin presencia de oxígeno), y procesos aeróbicos, como el compostaje (con presencia de oxígeno). Bajo procesos aeróbicos, la materia orgánica en proceso de descomposición se comporta inicialmente como una mezcla de partículas sólidas de materias primas con espacios porosos entre las partículas llenos de agua, aire y otros gases. La descomposición de la materia orgánica en el compostaje comienza con una mezcla de partículas sólidas rodeadas de una película líquida y espacios porosos llenos de aire y otros gases. La mayor parte de la descomposición aeróbica ocurre en esta capa líquida, donde los microorganismos utilizan el oxígeno disuelto para descomponer los compuestos orgánicos. El proceso de compostaje depende de varios factores, como el oxígeno, la humedad, los nutrientes, la porosidad y la temperatura, entre otros. Estos factores están interrelacionados y afectan la velocidad de transformación de la materia prima en compost (de Bertoldi *et al.*, 2022). El compostaje es un proceso biológico de descomposición y estabilización de la materia orgánica en condiciones que favorecen el desarrollo de altas temperaturas, resultantes del calor generado por la actividad microbiana en la materia orgánica (Rao & Parsai, 2023). Este proceso se divide en cuatro etapas: la fase mesofílica, en la que la degradación es llevada a cabo por microorganismos a temperaturas de 44°C; la fase termofílica, caracterizada por temperaturas más elevadas que favorecen la rápida descomposición de los residuos orgánicos (hasta 70°C), en la que los microorganismos consumen oxígeno y liberan dióxido de carbono y amoníaco (Arcas-Pilz *et al.*, 2023). La fase de enfriamiento, durante la cual se produce un desplazamiento de la comunidad microbiana hacia organismos mesófilos y se degradan los materiales orgánicos resistentes; y, por último, la fase de curado o maduración, en la que se forman sustancias húmicas que

enriquecen el compost. Este proceso da como resultado un producto final estable, libre de patógenos y semillas vegetales, que puede aplicarse en beneficio del suelo. (Andraskar *et al.*, 2023).

Los sistemas de tratamiento de la fracción orgánica se dividen en sistemas de compostaje descentralizado (SCD) (in situ), es decir en el lugar de generación de los residuos orgánicos o en un lugar alejado a su generación Centralizado (SCC). Los SCC son habituales tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados. (Rao & Parsai, 2023)

1.4.1. Sistema de compostaje centralizado (SCC)

Estas plantas son habituales en países desarrollados y en desarrollo. En los sistemas de compostaje centralizado (SCC), los RSU orgánicos de toda la ciudad se tratan en una única planta. Estas instalaciones suelen estar situadas fuera de la ciudad, lo que dificulta la participación de las comunidades en la economía circular y utilizar los recursos localmente, además del coste relativamente elevado de la recogida y el tratamiento centralizado de los biorresiduos (Weidner *et al.*, 2020).

Los SCC se realizan en espacios abiertos (hileras al aire libre y compostaje en pila estática o en estructuras cerradas (pilas cerradas de nave compostaje y compostaje en hileras). La capacidad de los SCC oscila entre 10 y más de 500 toneladas al día. (Rao & Parsai, 2023). Los sistemas de hileras pueden subdividirse en «pilas de aire forzado» e «pilas volteadas» en función del método de aireación (Bruni *et al.*, 2020).

Pilas de aire forzado: La materia orgánica se ubica en forma de pilas, para asegurar su aireación se instala una red de sistemas de tuberías debajo de estas. Esta tecnología es similar al compostaje por hileras volteadas, pero no existe el volteo del sustrato orgánico una vez formada la pila (Rao & Parsai, 2023). En lugar de girar se suministra aireación difusa en la parte inferior de los montones mediante el uso de sopladores de aire. La aireación en este sistema se puede llevar a cabo de dos formas: el aire es forzado hacia arriba a través de la masa de materia orgánica o es arrastrado hacia abajo y a través de ella (Bruni *et al.*, 2020). El proceso de compostaje en pilas estáticas aireadas tiene una duración que oscila entre 30 y 60 días. Este método implica una inversión considerable en la adquisición e instalación de sopladores, tuberías,

ventiladores y sensores de temperatura. En cuanto a la calidad del compost obtenido es generalmente inferior en comparación con otros métodos, como el sistema de compostaje descentralizado (SDC) (Rao & Parsai, 2023).

Pilas volteadas: La materia orgánica se mantiene en una hilera o pilas largas, generalmente tienen una altura de 3 metros y 5 metros de ancho. La aireación se realiza periódicamente en forma manual o mecánica. La duración del proceso de compostaje en pilas es de 60 a 190 días. La calidad del compost es inferior al obtenido en el SDC. Esta tecnología requiere de una superficie mayor y mano de obra continua y es adecuado para volúmenes mayores como RSU (Rao & Parsai, 2023).

Otra tecnología utilizada en los SCC, son los sistemas en recipiente que se dan mediante biorreactores, los cuales son divididos en dos tipos principales: horizontales y verticales.

Biorreactores verticales: Utilizan un tipo de contenedor cilíndrico o tanque con una capacidad de más de 1.500 m³.

Biorreactores horizontales: Funcionan en posición horizontal y pueden dividirse en canales, celdas, contenedores y túneles.

Además, los biorreactores en recipiente también pueden clasificarse en función del movimiento de la materia orgánica: Estáticos y dinámicos. Otro tipo de reactor es el reactor «inclinado», o más comúnmente llamado tambor giratorio. Algunos de los diseños de los tambores incluyen paletas internas que, combinadas con la acción rotatoria del tambor, contribuyen a la reducción de tamaño y a la mezcla de la materia prima (Bruni *et al.*, 2020).

1.4.2. Sistema descentralizado de Compostaje (SDC)

El compostaje descentralizado o a escala comunitaria surge como una solución prometedora frente a la inadecuada gestión de residuos y la pérdida de materia orgánica en vertederos, ganando popularidad desde la década de 1990 (Gillespie & Halog, 2023). Los sistemas descentralizados de compostaje SDC se desarrollan a pequeña y mediana escala, pueden ser comunitarios y/o domésticos, además suelen tener lugar en instituciones, barrios, parques públicos, municipios y condominios. Este sistema consiste en el tratamiento local de los residuos de cocina y jardín, así

como la salida del compost disponible para los residentes. En los SDC, el proceso de recogida de los residuos puede realizarse a través de las personas de la comunidad, quienes separan los residuos orgánicos generados en sus respectivos hogares y los compostan en un lugar determinado con la ayuda de compostadores que pueden ser modulares, tambor rotatorio, verticales, etc (en la parte trasera del hogar y/o de la comunidad (Rao & Parsai, 2023). Este método es conocido como sistema de transporte. La segunda forma es el «Sistema de recogida» en el que los biodegradables separados se recogen en la puerta de cada hogar (con el consiguiente cobro por este servicio) y último está el sistema «intermedio», en el que los residentes llevan sus residuos a un depósito donde luego serán trasladados por el personal responsable al cubo de compostaje. En términos de costo beneficio, el primero representa menor gasto, permite mayor implicación entre la comunidad y el sistema y es exitoso siempre y cuando se opere de manera óptima como se verá en este estudio. El segundo método resulta efectivo, pero es más costoso (de Souza & Drumond, 2022b).

Además de los beneficios ambientales, el sistema de compostaje descentralizado mediante el «sistema de transporte» incentiva la generación de puestos de trabajo locales capacitados técnicamente para la operación de los compostadores (Daskal *et al.*, 2022). Además de producir con éxito compost a partir de residuos orgánicos con bajos costes. Así, los SDC pueden sustituir eficazmente a los sistemas de compostaje centralizado —SCC— en varios aspectos tecnológicos y socioeconómicos (Manu *et al.*, 2019; Rathore *et al.*, 2022).

El SDC también puede producirse en pilas estáticas (con sistema de aireación), montadas en el suelo y encapsuladas por material semipermeable, que protege contra las plagas y la lluvia, mitiga los olores y retiene el vapor de agua, combatiendo muchos problemas comúnmente asociados al compostaje (Retherford *et al.* 2017) o en recipientes, que pueden ser verticales, inclinados u horizontales, fijos (será necesario girarlos) o giratorios, como los tambores giratorios perforados, que facilitan el giro y la aireación de los residuos, y las compostadoras automáticas. (de Souza & Drumond, 2022). En todos los casos, el SDC muestra una serie de ventajas frente a los SCC (de Souza & Drumond, 2022).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE DESCENTRALIZADO

En este apartado se presentan las principales ventajas ambientales, tecno-económicas y sociales del compostaje descentralizado, comúnmente señaladas por diversos autores -SCD-. (Bruni *et al.*, 2020; de Souza & Drumond, 2022; de Souza & Drumond, 2023; Weidner *et al.*, 2020).

Ventajas Ambientales SCD

- La adecuada separación en la fuente evita la contaminación con otro tipo de residuos (impropios), es por esta razón que la generación de residuos no se incrementa y las tasas de reciclaje aumentan ya que cada flujo está en donde le corresponde.
- En cuanto al compost obtenido, generalmente es de mejor calidad que el producido en plantas centralizadas, debido a una separación más eficiente y a un menor riesgo de contaminación por presencia de improprios.
- La ubicación cercana a la generación de residuos hace que el transporte sea más corto, con menores emisiones de GEI, menor desgaste de las carreteras y menor generación de tráfico y ruido.
- Aumento en la vida útil del relleno sanitario. Además de reducir el volumen, pretende producir compost de calidad
- El compost obtenido trae grandes beneficios al suelo como suministro de nutrientes.

Ventajas Tecno económicas SCD

- Las inversiones iniciales son menores que las de SCC.
- Los costos de recolección y transporte de residuos orgánicos relativamente bajos o nulos.
- Bajos costos operativos y de mantenimiento.
- Mayores Beneficios por los instrumentos financieros establecidos por el gobierno en relación con la disminución del canon por disposición final y aumento en el retorno del canon

- Reducción del gasto público, por el desvío de residuos que se destinarían a tratamiento a mayor escala.
- Operaciones a menor escala (hogar, vecindario o comunidad) sin necesidad de desarrollar habilidades especializadas
- Demanda de menos espacio.
- Uso de equipos y herramientas más sencillos, baratos y fáciles de entrenar, generando puestos de trabajo para mano de obra excedente poco cualificada.

Ventajas sociales SCD

- Esta práctica refuerza la soberanía sobre los recursos, permitiendo que los ciudadanos dependan menos de las cadenas globales de suministro y del entorno natural.
- La implicación de la comunidad permite que la educación ambiental en cuanto a manejo adecuado de residuos sea más efectiva
- Generación de nuevas oportunidades de empleo, así como el desarrollo de habilidades técnicas de operación de los compostadores

Además de las ventajas, se describen a continuación diversas experiencias de compostaje descentralizado desarrolladas en el marco del proyecto DECOST, mediante el cual se realizó esta investigación en la región del Mediterráneo Occidental, en España.

1.6. EL PROYECTO DECOST

El presente estudio se realizó en el marco del proyecto —DECOST— *Decentralized composting in small and medium-sized towns and villages*—, cuyo objetivo general consistía en desarrollar, implementar y validar un nuevo modelo de recogida y tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) basado en el compostaje descentralizado de hogares y comunidades, estrechamente integrado con proyectos de agricultura urbana, para avanzar hacia un enfoque de economía circular. Conformado por diferentes actores: Sociedad civil, científicos, municipios y otras partes interesadas en el proceso de gobernanza a todos los niveles.

El proyecto DECOST se desarrolló en las dos zonas geográficas del mediterráneo: Occidental y Oriental, con la participación de cuatro países: España e Italia en el

mediterráneo occidental. Palestina y Jordania en el mediterráneo oriental, dando lugar al compostaje descentralizado en pequeños pueblos y barrios de grandes ciudades, a través de iniciativas piloto de valorización de la materia orgánica.

Mediterraneo Occidental

España: Para el caso específico de España, el piloto se llevó a cabo en la Comunidad Autónoma de Cataluña en el municipio de Les Masias de Roda, cuyo objetivo principal fue sustituir el sistema de gestión centralizado de los residuos orgánicos por una gestión descentralizada. La experiencia demostrativa incluyó la instalación de áreas de compostaje comunitario y post-tratamiento, con capacidad de tratar el 100 % (90 t/año) de los residuos orgánicos municipales generados, atendiendo una población alrededor de 700 habitantes.

Italia: En cuanto a Italia, el proyecto DECOST se desarrolló en la ciudad de Potenza que incluye varios pueblos pequeños dispersos, razón por la que el SDC era la mejor alternativa y el municipio de Atella, cuyas actividades principales están relacionadas con la agricultura, especialmente la producción de vino y aceite, por lo que la comunidad de Atella también se beneficia del abono obtenido para sus cultivos. En total se trataron 120 t/año de FORM, 20 t/año Potenza y 80 t/año Atella, con una población implicada de 270 habitantes en Potenza y 700 habitantes en Atella.

Mediterráneo Oriental

Palestina: En Palestina, se instalaron dos tipos de compostaje: Compostadores domésticos y compostadores comunitarios. Los compostadores domésticos se instalaron en el jardín de cada vivienda, en Kufr Rumman (suburbio de Anabata), en este caso se trataron cerca de 544 t/año de materia orgánica, el compostaje obtenido fue utilizado por los mismos ciudadanos para sus huertos urbanos. En total se implicaron en el proyecto 2.848 personas.

El compostador comunitario fue instalado en la ciudad de Anabta, Tulkarm, al norte de Palestina, procesando 28 t/año de materia orgánica; el compost producido se utiliza en el abono de jardines públicos, rotondas y huertos escolares, mientras que el resto del compost se distribuirá entre los agricultores de Anabta, para el

abono de las tierras cultivadas. En cuanto a la población implicada en el proyecto DECOST, fue de 1848 habitantes.

Jordania: La implementación del proyecto DECOST en Jordania se llevó a cabo en Al sarrow, municipio situado en el norte de Jordania, dentro del distrito de Bani Kenana. El municipio de Al Sarrow, en Jordania, se enfrenta a problemas agrícolas debido a la escasez de agua en el país. La economía jordana es una de las más pequeñas de la región y adolece de falta de recursos naturales. En esta ciudad, se instalaron 100 compostadores domésticos, además de proporcionar junto a estos, trituradoras y medidores de temperatura. En total se trataron 148 t/año de materia orgánica.

El compost producido se utilizó en proyectos de agricultura urbana como enmiendas del suelo y fertilizantes. Además, también se distribuyeron compostadores a 16 ONG, entre ellas sociedades benéficas femeninas y sociedades juveniles situadas en el emplazamiento piloto de Jordania. La población involucrada corresponde a 676 habitantes.

El proyecto DECOST se destaca por ofrecer soluciones viables y versátiles para la gestión de materia orgánica en contextos diversos —urbanos, rurales, sociales y geográficos—, incluyendo zonas dispersas o alejadas donde la recolección resulta costosa o inviable. Además de proveer a una solución en áreas donde la escasez de recursos naturales como el suelo para producir alimentos es una problemática preocupante que atenta contra los derechos a una vida digna.

Además del proyecto DECOST, a nivel mundial, existen otros casos de estudio exitosos en la implementación del compostaje descentralizado.

1.7. CASOS EXITOSOS DEL COMPOSTAJE COMUNITARIO DESCENTRALIZADO

En países con alta densidad poblacional, elevados costos de recolección de residuos, zonas de difícil acceso y zonas dispersas, el compostaje comunitario descentralizado ha demostrado ser una solución efectiva. A diferencia de los sistemas centralizados, el compostaje descentralizado se realiza cerca de los puntos de generación de residuos, como hogares, comunidades y pequeñas empresas, lo que facilita el aprovechamiento de los residuos orgánicos al convertirlos en un recurso útil: El compost, que puede

emplearse para enriquecer suelos agrícolas y comunitarios. La implantación del compostaje comunitario en los últimos años ha sido muy intensa en varias zonas de España, (Vázquez & Soto, 2017). Una tendencia similar se observa en muchas otras partes del mundo, estimando el potencial de los sistemas de compostaje descentralizados para acoger hasta el 50 % de los residuos orgánicos municipales generados en Europa y Canadá. (Vázquez & Soto, 2017). Esta solución ha demostrado ser exitosa a lo largo de los cinco continentes, tal y como se describe a continuación:

Casos exitosos en el continente asiático: Continentes como Asia, destacado por ser el continente más grande y poblado del mundo, promueven el compostaje descentralizado en zonas rurales para este tipo de residuos. La ciudad de Surabaya, ubicada en la Isla de Java, se caracteriza por ser la segunda ciudad más grande de Indonesia. Esta isla, se convirtió en un modelo en el desarrollo del SDC y empezó a reproducirse en otras ciudades, al compostar 28.800 t/año. El ayuntamiento compra el compost o ayuda a su comercialización; la inversión inicial se recuperará en 2,5 años (de Souza & Drumond, 2022).

Otro caso exitoso es el de la Ciudad de Dakha, capital de Bangladés, en donde se tratan cerca de 1.095 t/año generadas por 1.430 hogares. La materia orgánica es recogida mediante el sistema puerta a puerta, la cual es tratada mediante compostaje descentralizado no mecanizado en hileras. Este sistema ha generado 10 puestos de trabajo y tras la inversión inicial se sostiene con las tasas de recogida y la venta de compost. Además, el proyecto fue amortizado en un lapso de 23 meses (de Souza & Drumond, 2022).

Por último, tenemos el caso en las zonas urbanas (apartamentos en condominios), en la Ciudad más grande y poblada de India -Mumbai-, en donde se compostan 5.4 t/año, a través de bidones perforados, reduciendo más del 80 % de la cantidad de residuos destinados a vertederos. Además, el compostaje promovió la construcción de un huerto colectivo; parte del compost estabilizado se destina a este huerto y parte a plantaciones individuales; los residentes reciben productos del huerto (de Souza & Drumond, 2022).

Casos exitosos en el continente africano: En otros continentes como África en áreas peri-urbanas de Zanzibar, Tanzania, y Swaziland también muestran exitosamente tratar la materia orgánica generada de poblaciones específicas como parte de la gestión

municipal de residuos. Involucrando desde 100 hasta 150 viviendas (Gillespie & Halog, 2023).

Casos exitosos en el continente americano: En Estados Unidos New York, en áreas urbanas tales como parques y plazas públicas se compostan 2.500 t/año. La mayor parte del compost se utiliza en espacios verdes urbanos (jardines comunitarios, granjas urbanas, árboles de la calle y parques); un porcentaje menor se utiliza para recompensar a los participantes. (de Souza & Drumond, 2022). Incluso grandes ciudades, como Chicago (Pai *et al.* 2019), donde se producen grandes cantidades de FORM, han desarrollado también el compostaje descentralizado. Dado que sistemas locales tienen costes significativamente más bajos que los modelos centralizados, el compostaje descentralizado también tiene beneficios positivos para el suelo, el reciclaje de nutrientes y la creación de empleo con el tratamiento por incineración (Alves *et al.*, 2024; Weidner *et al.*, 2020).

Casos exitosos en el continente europeo: La implantación del compostaje doméstico en los últimos años ha sido muy intensa en varias zonas de España, como Galicia, País Vasco, Navarra, Cataluña y otras (Vázquez & Soto, 2017).

Un caso exitoso en la gestión de residuos orgánicos en España se ha implementado en el noroeste del país, en la ciudad de Pontevedra, comunidad autónoma de Galicia. Allí, 26 municipios gestionan la fracción orgánica mediante un sistema descentralizado de compostaje comunitario, tanto en zonas rurales como urbanas, lo cual ha permitido tratar cerca de 2,000 t en tres años. Según de Souza & Drumond, (2022), aunque los costos iniciales de implantación fueron elevados, se estima que a largo plazo serán de 4 a 5 veces menores en comparación con el sistema centralizado.

Otro caso exitoso desarrollado en la comunidad autónoma de Galicia es el llevado a cabo en la Universidad de la Coruña. En el campus, cerca del 80 % de los residuos orgánicos (48t/año) generados en 11 comedores universitarios son tratados mediante compostadores estáticos y dinámicos ubicados en 9 zonas de compostaje diferentes. (de Souza & Drumond, 2022); los costes del compostaje descentralizado fueron inferiores a los costes medios del tratamiento de RSU en la región; el compost estabilizado es utilizado en los huertos de la universidad.

1.7.1. Evaluación ambiental

En el marco de la creciente preocupación global por los impactos ambientales derivados de los sistemas de producción y consumo, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se ha consolidado como una herramienta metodológica robusta para cuantificar impactos potenciales desde una perspectiva sistémica y bajo marcos normalizados internacionalmente (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Esta metodología resulta especialmente relevante en la gestión de biorresiduos, ya que permite identificar puntos críticos y comparar escenarios de tratamiento, evaluar beneficios en términos de reducción de emisiones y consumo energético, y generar evidencia científica para respaldar decisiones de sostenibilidad urbana y territorial.

Dentro del marco del ACV, la huella de carbono (Carbon Footprint, CF) se ha posicionado como uno de los indicadores más utilizados para evaluar el Potencial de Calentamiento Global (GWP100), cuantificando las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) expresadas en toneladas de CO₂ equivalente. Según la definición de Galli *et al.* (2012), la huella de carbono mide la cantidad total de GEI generada directa o indirectamente por una actividad o acumulada a lo largo de todas las etapas de un proceso. Tal y como señalan Casals Miralles *et al.* (2024), la CF se originó a partir del concepto de huella ecológica desarrollado en la década de 1990 y, en su evolución metodológica, ha adoptado estándares internacionales como ISO 14067:2018, la norma PAS 2050 (BSI, 2011) y el GHG Protocol (WRI & WBCSD, 2011, 2012), que clasifica las emisiones en tres alcances:

- Alcance 1: Emisiones directas desde fuentes propiedad o bajo control del sistema (por ejemplo, combustión de diésel en maquinaria propia).
- Alcance 2: Emisiones indirectas derivadas del consumo de energía adquirida (por ejemplo, electricidad de red).
- Alcance 3: Otras emisiones indirectas a lo largo de la cadena de valor, aguas arriba y aguas abajo del sistema.

1.7.1.1. Resultados ambientales positivos del sistema compostaje descentralizado —SDC—

Como resultado de estas experiencias, existen tres efectos ambientales positivos que coinciden en los casos de estudios reportados:

- 1) Reducción de emisiones de efecto invernadero entre un 35 y 50 % al comparar el compostaje como alternativa versus la disposición a vertederos o incineración (de Souza & Drumond, 2022). Adicionalmente, el vertido también provoca la contaminación de las aguas subterráneas por percolación de lixiviados, afectando negativamente a la salud humana (exposición a patógenos) y el medio ambiente (Andraskar *et al.*, 2023).

Algunos estudios científicos evaluaron la sostenibilidad medioambiental del compostaje comunitario comparando diversas opciones de funcionamiento entre sí y con otros sistemas de tratamiento de residuos, como el compostaje industrial y la incineración. Estos estudios se basaron en el control de las emisiones de gases y en la evaluación del ciclo de vida y concluyen que el compostaje comunitario es tan sostenible o más que otras opciones de tratamiento de residuos biológicos y que el principal factor de impacto está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero (Vázquez & Soto, 2017).

- 2) Mejoras en la separación en la fuente, disminuyendo la contaminación de residuos hasta en un 23 % en 3 años permitiendo su aprovechamiento y evitando su disposición final (de Souza & Drumond, 2022b).
- 3) Obtención de un producto de calidad (Compost) que puede ser utilizado para enriquecer y mejorar las características del suelo (Alves *et al.*, 2024; Weidner *et al.*, 2020).

1.7.2. Análisis tecno económico y social

En el marco de la sostenibilidad, el análisis tecnoeconómico (TEA) se consolida como una herramienta esencial para evaluar de manera integral la viabilidad de proyectos que combinan objetivos ambientales, sociales y económicos (Zheng *et al.*, 2023). Esta metodología permite integrar, de forma estructurada, variables como la viabilidad

técnica del sistema, los costes de inversión y operación, así como la proyección de retornos económicos a lo largo del tiempo (Deng *et al.*, 2024). Asimismo, incorpora factores estratégicos como la evaluación de riesgos operativos, el contexto político-regulatorio y los posibles impactos ambientales, convirtiéndose en un enfoque particularmente valioso para la planificación y la toma de decisiones fundamentadas en la gestión de residuos (Pires *et al.*, 2011).

En el caso de los sistemas descentralizados de compostaje comunitario, el TEA ofrece una visión precisa no solo de la factibilidad económica del modelo, sino también de su potencial de replicabilidad y sostenibilidad a largo plazo (Mazzanti & Zoboli, 2008). A ello se suma la evaluación del impacto social, que resulta imprescindible para comprender cómo las soluciones técnicas influyen en la calidad de vida, la equidad y la cohesión social de las comunidades (Wilson *et al.*, 2012). Este análisis incorpora marcos de referencia reconocidos —como la Evaluación de Impacto Social (*Social Impact Assessment*, SIA) y el Retorno Social de la Inversión (*Social Return on Investment*, SROI)—, que permiten estructurar indicadores y analizar percepciones con base en evidencias tanto cuantitativas como cualitativas (Evans *et al.*, 2013).

Bajo este enfoque, la presente sección examina, por un lado, los indicadores económicos del modelo de compostaje comunitario descentralizado en Les Masies de Roda, considerando su estructura de costes (CAPEX y OPEX), su viabilidad financiera y el papel del retorno del canon como incentivo económico. Por otro, se analizan los impactos sociales generados, incluyendo la creación de empleo verde, la participación ciudadana y la apropiación comunitaria del sistema, así como su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Bulkeley & Newell, 2015; Monroe *et al.*, 2019). De este modo, se ofrece una visión integral que combina el rendimiento económico con el valor social creado, aportando evidencia sobre la sostenibilidad y la capacidad de replicabilidad del modelo.

1.7.2.1. Resultados tecno económicos y sociales positivos del compostaje descentralizado

En general los beneficios tecno-económicos relacionados con el compostaje descentralizado se destacan en:

- 1) Menores costes de inversión que el compostaje centralizado: Como se evidencia en Dhaka · Bangladesh La investigación reveló que el coste global de la instalación descentralizada de compostaje era de 857.110 dólares, mucho menos que los gastos asociados al vertido y a los métodos convencionales de compostaje (Ashraf *et al.*, 2024).
- 2) Menores costes logísticos y operativos que el compostaje centralizado y la disposición en vertederos: Según Weidner *et al.* (2020), al realizar una evaluación económica de cinco sistemas de tratamiento de residuos en el área metropolitana de Oporto, se encontró que los sistemas locales de compostaje presentaron el coste total más bajo en comparación con otros sistemas. A escala regional, estos sistemas locales tuvieron costes notablemente inferiores a los de los modelos centralizados, siendo la mano de obra responsable de entre el 97 % y el 98 % de los costes operativos. Esto convierte al compostaje local en una opción atractiva para los municipios en la gestión de residuos orgánicos (FORM).
- 3) Generación de ingresos por la venta del compost de alta calidad.
- 4) Generación de empleo local: Según de Souza & Drumond (2022). En el proyecto desarrollado en la Ciudad de Dakha, se generaron 10 puestos de trabajo. Además, en Europa bajo el proyecto DECOST se generaron en total 67 empleos verdes.

1.7.3. Características del compost obtenido en el compostaje descentralizado y sus usos en proyectos de agricultura urbana

El compost producido mediante compostaje descentralizado es adecuado para huertos urbanos y proyectos de agricultura urbana. Además de estar libre de improprios, cumple con las normativas legales en cuanto a propiedades fertilizantes, con valores apropiados de estabilidad y madurez (Alves *et al.*, 2024).

Este compost se caracteriza por su alto contenido de materia orgánica, alcanzando en promedio un 65 %, lo cual se debe a la naturaleza de las materias primas utilizadas (Alves *et al.*, 2024). Estos valores son coherentes con estudios previos sobre el compostaje de residuos orgánicos municipales (OFMSW), como los realizados por Alves *et al.* (2024) y Torrijos *et al.* (2021). Asimismo, la relación C/N indica que el proceso de compostaje conserva bien los nutrientes, resultando en un producto de alto valor fertilizante.

En términos de cumplimiento normativo, el compost obtenido cumple con la normativa española (BOE, 2013), que clasifica el compost en tres categorías (A, B y C) en función de su contenido de metales pesados. En general el compost se encuentra en clase A, conforme con investigaciones previas (Torrijos *et al.*, 2021). Además, de la ausencia de microorganismos patógenos, lo cual garantiza un producto higienizado y seguro para su uso agrícola.

En cuanto a su uso en proyectos agrícolas, existe el caso de aplicación en Potenza, Italia, en el marco del proyecto DECOST. En este proyecto, el compost producido fue utilizado en una iniciativa de agricultura urbana impulsada por Legambiente Circolo di Potenza «Ken Saro Wiwa APS», la mayor ONG medioambiental de Italia, en los suburbios de Potenza.

Otro ejemplo del uso del compost producido por el SDC se encuentra en Palestina, donde se emplea como fertilizante en jardines públicos, rotondas y huertos escolares. Además, el compost se distribuye entre los agricultores de Anabta para enriquecer las tierras cultivadas. La agricultura urbana en esta región cubre solo el 25 % de las necesidades alimentarias de los residentes, mientras que el resto de los alimentos se importa de otras ciudades palestinas debido a la falta de planes específicos para su desarrollo. En este contexto, el compost comunitario representa una excelente oportunidad para mejorar la calidad del suelo en las áreas cultivadas y contribuir a la autosuficiencia agrícola tanto en la ciudad como en las zonas verdes.

En otras investigaciones de compostaje comunitario (Torrijos *et al.*, 2021), el compost obtenido a partir de los residuos orgánicos generados en el comedor universitario y los residuos de poda de la jardinería, al ser aplicados, mejoraron la salud del suelo, incluso con tasas de enmienda muy elevadas, del 33 % en volumen en suelos degradados. Además, esta investigación muestra que más de la mitad de los

usuarios cultivaron con frecuencia ocho hortalizas, pero la diversidad de cultivos se extiende a más de 25 especies.

Finalmente, en el caso de los municipios de Carrícola y Fontanars (Valencia, España), se obtuvo un compost con un grado de madurez y estabilidad, así como la riqueza fertilizante fue adecuado demostrando su valor añadido como sustituto de los fertilizantes minerales en los cultivos. En general, el compost obtenido no presentó fitotoxicidad y mostró buena calidad sanitaria, con niveles de patógenos humanos por debajo de los límites permitidos para su uso como fertilizante (Álvarez-Alonso *et al.*, 2024).

A pesar de las ventajas ambientales, tecno-económicas y sociales de los SCD, así como del compost obtenido, existen algunas desventajas en este tipo de tecnologías que se pueden identificar como las brechas del conocimiento en este tipo de investigaciones.

1.8. IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS EN EL CONOCIMIENTO

El compostaje descentralizado ha emergido como una solución potencialmente efectiva para la gestión de residuos orgánicos en comunidades medianas y pequeñas. Sin embargo, existen dudas sobre si esta alternativa es viable no solo desde una perspectiva ambiental, sino también económica y técnica. Para un municipio alrededor de 704 habitantes, se plantea la necesidad de evaluar si es posible tratar el 100 % de la materia orgánica generada utilizando un sistema de compostaje descentralizado.

1.8.1. Descripción de la brecha

Existe una falta de conocimiento claro y preciso acerca de la viabilidad integral del compostaje descentralizado en comunidades de esta escala. En particular, se desconoce si:

Económicamente: Es una alternativa rentable para el tratamiento de la totalidad de los residuos orgánicos generados teniendo en cuenta su articulación con el modelo financiero establecido en Cataluña en lo referente al retorno del canon y las tasas ambientales.

Técnicamente: Es posible implementar y mantener un sistema descentralizado capaz de gestionar el 100 % de los residuos orgánicos, teniendo en cuenta las demandas operativas en donde deben prevalecer las condiciones óptimas de humedad, temperatura y oxígeno que demandan esfuerzos físicos y tiempo.

Ambientalmente: El compostaje descentralizado resulta ser la opción más sostenible para minimizar el impacto de los residuos orgánicos en una población de esta magnitud, teniendo en cuenta las emisiones evitadas en cuanto a transporte y eliminación del uso de fertilizantes químicos, así como el de obtener un producto, como el compost, de mejor calidad que el obtenido en el compostaje centralizado.

1.8.2. Impacto de la brecha

La ausencia de un análisis integral que considere los tres aspectos clave —económico, técnico y ambiental— podría conducir a decisiones inadecuadas en la gestión de residuos. Si no se comprenden completamente las limitaciones o ventajas del compostaje descentralizado, se corre el riesgo de implementar sistemas ineficaces, costosos o insostenibles.

Es por esta razón que en este estudio se llevan a cabo estudios que abordan cada uno de estos aspectos: análisis de costos, viabilidad técnica (infraestructura, personal, mantenimiento) y evaluación ambiental (reducción de emisiones y población beneficiada por el uso del compost). Estos estudios servirán para determinar si el compostaje descentralizado puede gestionar el 100 % de la materia orgánica en municipios pequeños como LMR.

Esta investigación está enfocada en la optimización del compostaje en plantas de tratamiento de residuos, los cuales requieren una comprensión profunda de los factores operativos y condiciones ambientales que afectan el proceso.

Los casos descritos por continente muestran que los SCD han demostrado ser exitosos, no obstante, aún existen desafíos en términos de operación, sobre todo en los casos en que estas actividades son totalmente manuales y la masa de toneladas a remover es similar o mayor a 90 t/año, adicionalmente es importante estudiar la integración con políticas municipales e instrumentos que permitan su viabilidad financiera.

Es por esta razón que esta investigación busca abordar estos desafíos en términos operativos y económicos con el fin de que estos sistemas de tratamiento sean sostenibles en el tiempo, centrándose en la viabilidad del compostaje comunitario en pequeñas y medianas ciudades y su potencial para mejorar la gestión de residuos, no solo a nivel ambiental sino también desde el punto de vista tecno económico.

Estos casos demuestran el potencial del compostaje comunitario para transformar la gestión de residuos, sin embargo, aún queda mucho por entender en cuanto a los factores que determinan su éxito en diferentes contextos. Por ello, el presente estudio se enfoca en el análisis tecno económico, ambiental y social cuando el tratamiento de la materia orgánica a través del SCD es la única vía de tratamiento establecido por un nuevo marco de gestión de residuos.

1.8.3. Limitaciones del estudio

La falta de publicaciones relacionadas con el rendimiento del proceso de compostaje y, concretamente, en el campo de las emisiones gaseosas atmosféricas, conduce a una de las brechas más importantes que se deben cubrir a futuro relacionada con la estimación de los gases tales como amoníaco, metano, dióxido nitroso, compuestos orgánicos volátiles y olores generados en el compostaje comunitario, ya que su masiva implementación puede significar un reto en cuanto a la caracterización y posterior control.

Si bien existen factores de emisión establecidos por fuentes como el Cambio Climático (IPCC) en las Directrices de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006) para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero del proceso de compostaje, estos están sujetos a variaciones en función de la escala y condiciones del compostaje, dejando en evidencia la necesidad de estudiar específicamente las emisiones de CH₄ y N₂O por unidad de masa de FORM tratados en los sistemas de compostaje comunitario (González *et al.*, 2024).

En cuanto al control de olores es un aspecto crítico que puede afectar tanto la viabilidad del compostaje descentralizado como la aceptación social del sistema. Por ello, resulta esencial continuar investigando y desarrollando soluciones eficaces para mitigar este impacto y garantizar que el compostaje se realice de manera sostenible

y sin inconvenientes para la comunidad (González *et al.*, 2024). Las plantas de tratamiento de residuos suelen generar quejas públicas debido a emisiones de compuestos orgánicos volátiles (terpenos, alcoholes, cetonas, compuestos azufrados, aminas) y amoníaco, frecuentemente ocasionadas por falta de datos que faciliten la optimización de su operación y el diseño de medidas de mitigación como los biofiltros, pero esto depende de contar con datos precisos y modelos predictivos. La aplicación de herramientas de simulación y modelización permite mejorar la eficiencia del compostaje, garantizando un control más efectivo sobre el proceso y una mayor calidad del compost final, lo que hace de estas prácticas una solución sostenible y viable para la gestión de residuos orgánicos (Onwosi *et al.*, 2017).

CAPÍTULO II

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS



CAPÍTULO II

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPÓTESIS

El compostaje comunitario descentralizado se plantea como una solución tecnológica con potencial para ser económica, ambiental y socialmente sostenible, capaz de gestionar la totalidad de la materia orgánica generada en el municipio de Les Masies de Roda. En comparación con tecnologías centralizadas, este modelo muestra indicios de menores costos operativos y de una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, ofrece beneficios sociales al proveer compost para su aplicación en suelos locales y al promover la participación comunitaria en la gestión de residuos.

2.2. OBJETIVO GENERAL

Implementar el marco general de integración del compostaje comunitario descentralizado dentro del sistema municipal de gestión de residuos, considerando la separación en origen de la fracción orgánica, su tratamiento local como única vía de gestión y la valorización del compost obtenido en proyectos de agricultura urbana.

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Rediseñar y optimizar el proceso de compostaje comunitario descentralizado en Les Masies de Roda mediante una gestión profesionalizada de los compostadores, con el propósito de obtener un producto de calidad, minimizar las posibles molestias a los usuarios y analizar técnicamente su desempeño.

Analizar los costos y la viabilidad económica y social del sistema de compostaje comunitario descentralizado, poniendo especial énfasis en la reducción de gastos vinculados a la gestión municipal de la fracción orgánica y en los beneficios comunitarios generados a través de la participación ciudadana.

Evaluar ambientalmente el proceso de compostaje comunitario descentralizado, considerando sus beneficios en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en la valorización de la fracción orgánica mediante la obtención de compost.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo describe los métodos empleados para el diseño, implementación y evaluación del sistema de compostaje comunitario descentralizado, desarrollado para la gestión de residuos orgánicos en el municipio. Se presentan las características del modelo de gestión previo, basado en el compostaje centralizado, y los cambios introducidos en el nuevo sistema, concebido como la única vía de tratamiento de la fracción orgánica, garantizando la producción de compost para su aplicación en proyectos de agricultura urbana. Este enfoque no solo promueve la valorización de los residuos, sino que también contribuye a la reducción de costos logísticos y ambientales, optimizando la gestión de los residuos orgánicos a nivel local.

Asimismo, se detallan los criterios técnicos empleados para el dimensionamiento, distribución y operación de las áreas de compostaje, así como los aspectos clave en el postprocesamiento del compost, incluyendo la gestión de lixiviados y el tamizado del material final.

Finalmente, la viabilidad del sistema fue evaluada mediante indicadores y metodologías específicas, abarcando aspectos fisicoquímicos, ambientales y socioeconómicos, con el propósito de medir su impacto, eficiencia y aceptación dentro de la comunidad.

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL LES MASIES DE RODA —LMR—

3.1.1. Ubicación

Les Masies de Roda —LMR— es un municipio español ubicado en el noreste de la Península Ibérica, a unos 90 km al norte de Barcelona, dentro de la Comunidad Autónoma de Cataluña, de la comarca de Osona, situado a unos 6 km de la capital de la comarca, Vic. La Figura 3.1 muestra su localización y distribución geográfica. El municipio tiene una superficie total de 16,38 km² y se sitúa a una altitud de 467 metros sobre el nivel del mar. El término municipal rodea prácticamente el municipio de Roda de Ter y limita en el norte con Santa Maria de Corcó, a levante con Tavertet

y Vilanova de Sau, en el sur con Tavèrnoles, a poniente, a la confluencia de los ríos Gurri y Ter, con Gurb y en el noroeste con Manlleu.(Ajuntament de Les Masies de Roda, 2004)



Figura 3.1. Localización y distribución geográfica Les Masies de Roda. Adaptado de: Ajuntament (Les Masies de Roda 2025)

3.1.2. Características del suelo y clima

Las características del terreno en LMR, son el resultado de la mezcla de 4 tipos diferentes de suelos: *Haplustept calcic*, *Typics Calciustepts*, *Lithic Ustorthents* y *Lithic Haplustolls*. Todos estos tipos de suelos presentan temperaturas más cálidas en profundidad y un régimen de humedad ústico, típico de climas semiáridos o subhúmedos con humedad limitada. Suelen ser suelos de drenaje libre, neutros a calcáreos en algunas profundidades y en algunos casos presentan carbonatos en los horizontes superiores. Las pendientes suelen ser de moderadas a pronunciadas, en pocas zonas suelen encontrarse pastos, aunque la mayoría de los suelos se utilizan para cultivos de cereales y forrajes, cuando las pendientes son adecuadas.

Los usos del suelo se encuentran en su mayoría ocupados en actividades agrícolas, cuya superficie utilizada es de 684 ha, distribuidas entre tierras labradas (487 ha) con la distribución de cultivos tales como cereales de grano (260 ha), forrajes (154 ha), otros cultivos herbáceos (63 ha) y barbechos (9 ha). Además de 196 ha de pastoreo permanente.

Por lo anterior, LMR se caracteriza como un municipio rural y disperso, donde predominan las viviendas con jardín y barrios con amplias zonas verdes. Estas características hacen que sea un territorio idóneo para la implementación de un sistema de compostaje comunitario descentralizado (SCD), permitiendo el tratamiento in situ del 100 % de la materia orgánica generada. Para su instalación, se consideraron criterios clave como la baja densidad residencial, la disponibilidad de residuos de poda y jardinería provenientes de las áreas verdes, y la necesidad de compost para optimizar el desarrollo de cultivos locales. La Figura 3. 2 muestra la vista aérea de uno de los barrios de Les Masies de Roda (Del Vicenç) como ejemplo representativo del trazado del municipio. Como puede observarse, presenta una fuerte abundancia de zonas verdes comprendidas por jardines de las viviendas, así como áreas destinadas a cultivos agrícolas.



Figura 3.2. Vista área del Barrio Del Vicenç en LMR. Fuente: DECOST (2021)

En cuanto al clima de Osona, la Comarca donde se encuentran Les Masies de Roda, es un clima Mediterráneo Continental Húmedo según el Servei meteorològic de Catalunya (2021), aunque en la zona norte y este las precipitaciones son abundantes y las temperaturas más bajas. Las precipitaciones se distribuyen a lo largo del año y el invierno es la estación más seca. En cuanto a las temperaturas, el verano es caluroso y el invierno es frío en toda la Comarca, con inversión térmica y nieblas. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 11 °C y los 13 °C. En las zonas occidentales y prepirenaicas, las temperaturas son ligeramente inferiores (9 a 11 °C). En cuanto a las precipitaciones, existe un gradiente de oeste a este de la región que oscila entre los 650 mm y los 1100 mm.

3.1.3. Contexto social y demográfico

La población total del municipio es inferior a 5.000 habitantes, lo que contribuye a su clasificación como un territorio de tipología rural (ARC, 2022). LMR presenta una baja densidad poblacional, con 42,7 habitantes por km². En 2021, contaba con 704 habitantes, cifra que ha aumentado a 745 en la actualidad. El municipio dispone de un total de 250 viviendas, de las cuales 200 son principales y 50 no principales. Según los datos del último Censo de Población y Vivienda (2021), el tamaño medio de los hogares es de 2,85 personas. La población se encuentra distribuida en cuatro núcleos urbanos separados entre sí: Cases Noves, Esquerda, Fontanelles y Vicenç. Adicionalmente, un porcentaje de los habitantes reside en viviendas no principales, ubicadas en masías diseminadas, muchas de ellas con una extensa historia y un fuerte vínculo con el territorio rural del municipio. La Tabla 3.1 muestra la población por género y edad.

Tabla 3.1. Distribución de la población LMR

Población por genero	Habitantes
Femenino	357
Masculino	388
Población por edad	Habitantes
0 a 14 años	113
15 a 64 años	465
65 a 84 años	139
85 y más años	28

Fuente: Institut d'Estadística de Catalunya (2024)

Les Masies de Roda es un municipio caracterizado por una población envejecida, una proporción limitada de jóvenes y una baja representación de personas de nacionalidad extranjera. Estas particularidades pueden derivar en una reducción de la población activa a mediano y largo plazo. Actualmente, el 48 % de la población es femenina y el 52 % masculina. En términos de distribución por edad, el 23 % de los habitantes tiene más de 65 años, lo que refleja un marcado envejecimiento poblacional, corroborado por un índice de envejecimiento del 147,79 %, superior al promedio de la demarcación de Barcelona, que se sitúa en 139,39 %.

Por otro lado, la población de nacionalidad extranjera representa apenas el 9 %, lo que sugiere un aporte limitado al rejuvenecimiento demográfico. En cuanto a la composición etaria, el 62 % corresponde a personas adultas y solo el 15 % a jóvenes, evidenciando una proporción moderada de población joven, insuficiente para garantizar un equilibrio generacional sostenible, especialmente sin un incremento significativo en la natalidad o en los flujos migratorios.

Estas características demográficas, junto con la baja densidad poblacional del municipio, justifican la necesidad de descentralizar los servicios, facilitando su prestación de manera más eficiente y adaptada a las condiciones locales (Diputació de Barcelona, 2024).

3.1.4. Actividades Económicas

Las principales actividades económicas en LMR están orientadas a la agricultura y ganadería. La cría de ganado vacuno, pollos y cerdos complementa las actividades económicas rurales. Además, el municipio cuenta con algunos comercios y servicios (restaurante, hostel, tiendas de alimentación y productos básicos, escuelas, centros de salud, zonas deportivas y lúdicas, etc.).

En LMR la renta media por persona en el año 2021 era de 19.516€, frente a la renta media de la demarcación de Barcelona de 19.220 €. En cuanto al porcentaje de formación, en el municipio hay un 10,5 % de personas con un nivel bajo de estudios.

La renta total del municipio en el año 2020 era de 979.108 €. El número de asalariados en Les Masies de Roda era de 491 a finales de 2019, distribuidos en los siguientes sectores: Agricultura (8,09 %), Industria (36,5 %), Construcción (6,31 %) y Servicios (49,1 %).

Las personas activas representan el 51,1 % de la población, mientras que solo el 4,57 % de la población está en paro, el 22 % se clasifican como personas inactivas y el 22,4 % jubilada. En Les Masies de Roda hay 35 empresas, el 22,1 % con menos de 10 trabajadores y el 87,9 % de 11 a 250 trabajadores. La industria tiene poca presencia en la economía del municipio. Las actividades industriales textiles, metalúrgicas y de automatización están presentes en Les Masies de Roda. Sin embargo, en Osona, la Comarca donde se ubica el municipio, la Industria de Alimentación y Distribución es el principal sector que sustenta la economía. Empresas como Bon Preu, La Farga y Casa Tarradellas son el motor de la economía de la Comarca.

3.1.5. Generación de residuos

La generación anual de residuos domésticos en LMR se sitúa entre 300 y 350 toneladas, lo que representa aproximadamente el 0,01 % del total de residuos generados en Cataluña. Los datos sobre la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) han sido obtenidos a partir de la ARC, entidad responsable del control y gestión tanto de los residuos urbanos como de los industriales en la región.

En promedio, la fracción orgánica recogida selectivamente asciende a 55 toneladas por año (16,34 % del total), mientras que la poda representa aproximadamente 1 tonelada anual (0,30 %). La fracción de residuos mezclados alcanza las 124 toneladas anuales (37,20 %), y otras fracciones recogidas selectivamente, como voluminosos, aceite vegetal, textil, chatarra y residuos en pequeñas cantidades, suman 36 toneladas anuales (10,75 %). Adicionalmente, se registran 29,94 toneladas por año de vidrio (8,95 %) y 88 toneladas anuales de residuos multiproducto, que incluyen envases ligeros, papel y cartón. La Figura 3.3 describe lo mencionado.

En relación con la generación y separación de residuos, como se analizará en detalle en la sección de generación de residuos orgánicos, aproximadamente el 28 % del total de los residuos generados corresponde a materia orgánica. Sin embargo, en el caso de LMR, se estima que alrededor del 12 % de la materia orgánica aún permanece sin separar dentro de la fracción de residuos mezclados, lo que evidencia oportunidades de mejora en la gestión de esta fracción.

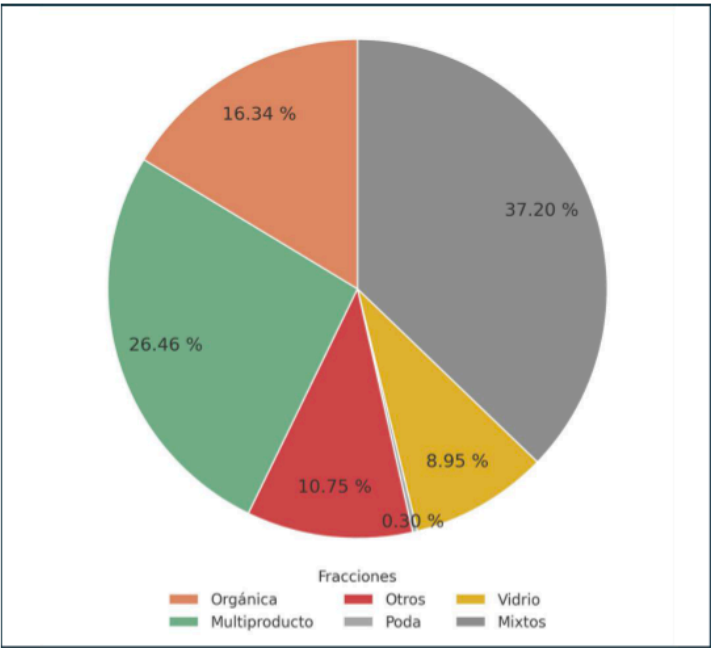


Figura 3.3. Composición de residuos sólidos municipales LMR. Adaptado de ARC (2020)

3.1.6. Problemática asociada

En los últimos diez años, la generación de residuos en Les Masies de Roda aumentó un 14 % (73 toneladas), mientras que la generación per cápita se incrementó un 20 %, pasando de 1,61 a 2,02 kg/habitante/día, a pesar de que la población disminuyó en 55 habitantes (7,8 %) durante el mismo periodo (Figura 3.5). Este incremento en los residuos generados no obedece al comportamiento de los residentes locales, sino principalmente a un fenómeno conocido como turismo de residuos, que consiste en la eliminación inadecuada de residuos provenientes de municipios vecinos en el territorio de LMR.

El impacto del turismo de residuos fue particularmente significativo en 2018 y 2019, años en los que se registraron los valores más altos de generación total, atribuibles principalmente a la fracción mixta. Debido a esta distorsión en los datos, para los análisis posteriores se considerará como referencia la media de generación de residuos de los años 2012 a 2017, en los cuales no se detectó este fenómeno. La media anual de este periodo es de 330 toneladas, y se utilizará como base para el diseño y evaluación del sistema de compostaje descentralizado.



Figura 3.4. Ejemplo caso de turismo de residuos

En el análisis histórico de la generación de residuos en LMR (Figura 3.5), se observa una disminución del 22 % entre 2009 y 2019, pasando de 444 toneladas en 2009 a 347 toneladas en 2019. La generación per cápita también descendió un 17 %, de 1,61 a 1,33 kg/habitante/día, en un contexto de reducción poblacional del 7,8 % (55 habitantes menos).

Entre 2009 y 2013, la generación de residuos mostró variaciones significativas, con una disminución del 28 % (123 toneladas), alcanzando una media anual de 380 toneladas. Durante el periodo 2014-2017, los datos se estabilizaron en un rango de 300 a 350 toneladas, con una media de 330 toneladas, reflejando los años más homogéneos en términos de generación. Sin embargo, en 2018 y 2019, se produjo un aumento drástico, pasando de 335 toneladas en 2017 a 516 toneladas en 2019, un incremento de 181 toneladas atribuido al fenómeno del turismo de residuos.

Dada la influencia del turismo de residuos en los años 2018 y 2019, y considerando la estabilidad de los datos previos, para los análisis del presente estudio se tomarán como referencia los años 2012-2017, con una media de 330 t/año, representativa de la generación real del municipio, y una generación per cápita de 1,3 kg/hab/día, tal y como se observa en la Figura 3.5.

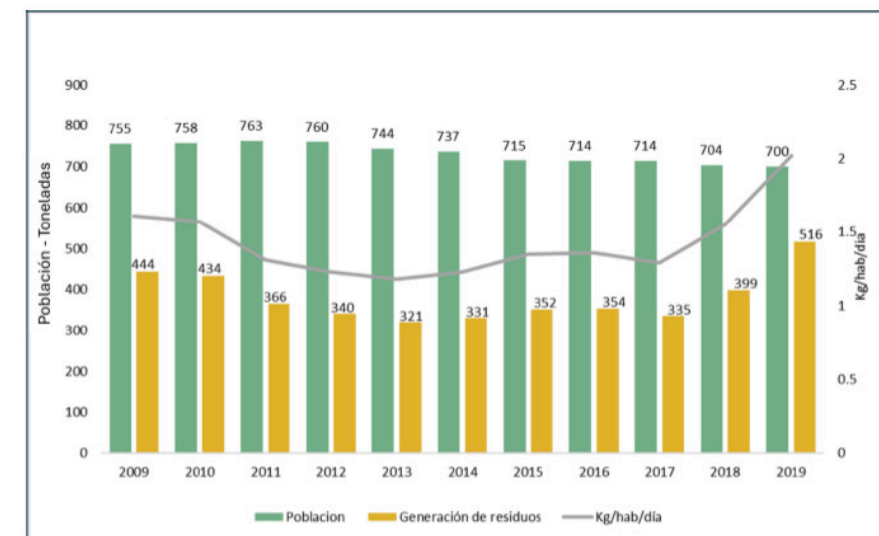


Figura 3.5. Efectos en la generación de residuos municipales por turismo de residuos. Adaptado de ARC (2020)

La generación total de residuos Municipales muestra un aumento significativo en los años 2018 (399 Tn) y 2019 (516 Tn), que se debe al aumento de la fracción mixta para tratamiento biológico en estos mismos años 2018 (173,1 Tn) y 2019 (234,2 Tn), la principal razón de este aumento es el turismo de residuos, como se ha explicado anteriormente.

3.1.7. Generación de residuos orgánicos

La ARC realiza anualmente caracterizaciones de los distintos flujos de residuos municipales que ingresan a las plantas de tratamiento, con el objetivo de estimar su composición. Estas caracterizaciones permiten definir la «bolsa tipo», estableciendo el peso de cada fracción de residuos y determinando su proporción dentro del total, donde el 100 % representa el contenido completo de la bolsa tipo (fracción resta).

A partir de estas caracterizaciones, se ha determinado que la fracción orgánica representa aproximadamente el 28 % del total de residuos municipales. Adicionalmente, la Agencia de Residuos de Cataluña estima que la generación per cápita de residuos municipales es de 1,3 kg/hab/día. Con base en este dato y en la proporción de cada fracción en la bolsa tipo, es posible calcular la generación per cápita específica para cada tipo de residuo.

En LMR, los principales generadores de residuos orgánicos son los ciudadanos con aproximadamente 90 t/año de fracción orgánica generada. Aparte de ellos, hay cuatro instalaciones que amplían la fracción o residuos orgánicos generados en el municipio: restaurante (1), guardería (2), club de tenis (3), pabellón deportivo (4). La Tabla 3.2, resume la estimación de residuos orgánicos a compostar en cada barrio del municipio: Zona del Ayuntamiento (ZA), Cases Noves (CN), l'Esquerda (E), Fontanelles (F) y Vicenç (V).

Tabla 3.2. Estimación de residuos orgánicos generados en cada barrio de LMR

DESCRIPCIÓN	ZA	CN	E	F	V
Número de habitantes	169	200	50	160	125
FORM (t/año)	25	29	7,0	23	18
Volumen anual total (m³) (FORM+AE) *	49	58	14	46	36

*FORM+AE: Fracción orgánica municipal + agente estructurante. *Adoptado de DECOST (2021)*

3.1.7.1. Características de la materia orgánica de LMR

La composición de la materia orgánica de LMR es determinada mediante las caracterizaciones realizadas por la ARC (2021). De esta manera se sabe que proporción en peso es materia orgánica neta, poda e impropios (residuos que no son orgánicos, como bolsas plásticas no compostables, plásticos, mixtos, film, papel y cartón). A partir de la caracterización se obtiene un resultado que especifica la proporción de cada elemento de la muestra. La Tabla 3. 3 muestra un promedio de las caracterizaciones en los años estudiados previos a la implementación al nuevo modelo de gestión de residuos. En donde la media de fracción orgánica neta fue de 94 % y 5,2 % de impropios en la fracción orgánica.

Tabla 3.3. Caracterizaciones de la materia orgánica de LMR

AÑO	N.º de Caracterizaciones	Media fracción orgánica neta	Media fracción vegetal	Media impropios
2012	2	90 %	3 %	7 %
2014	3	96 %	0 %	4 %
2015	3	95 %	0 %	5 %
2016	2	95 %	0 %	5 %
2017	1	95 %	0 %	5 %
PROMEDIO	2	94 %	0,6 %	5,2 %

*Para el año 2013 no se encontró información. *Adoptado de Recollida de residus d’ Osona (2012-2017)*

En relación con la fracción vegetal, como se indicó en la sección 3.1.5 sobre generación de residuos, esta representa una cantidad de 1 tonelada por año, siendo recogida de manera selectiva.

3.2. FUNCIONAMIENTO MODELO ANTERIOR

Hasta el primer semestre del año 2020, los residuos generados en LMR eran recogidos, transportados, tratados, reciclados y/o valorizados, bajo el modelo de recolección en acera, llevado a cabo por la Empresa de servicios públicos Recollida de Residus d’Osona, gestionando cerca del 82 % de los residuos sólidos urbanos, y sus fracciones segregadas, generados en Osona. La eliminación y recogida de residuos en Osona se realiza a través de diferentes sistemas dependiendo del municipio.

3.2.1. Recolección de residuos

LMR contaba con cuatro tipos de contenedores ubicados en las aceras del municipio, destinados a la recolección diferenciada de las distintas fracciones de residuos municipales: materia orgánica, vidrio, envases ligeros y papel/cartón, y residuos sólidos mixtos. La Figura 3.6 ilustra la distribución de estos contenedores en las aceras, organizada por tipo de fracción recolectada. Estas ubicaciones constituyeron el primer criterio considerado para la posterior instalación de los compostadores comunitarios.



Figura 3.6. Localización de los contenedores en acera. Vecindarios: A) Vicenç [41-59'45.2»N 2-17'44.3»E]; B) Fontanellas [41-58'12.7»N 2-18'02.1»E]; C) Esquerda [41-58'37.9»N 2-18'44.0»E]; y D) Casas Nuevas [41-59'18.3»N 2-19'09.6»E]. Adaptado de (DECOST, 2021).

A continuación, se describe el contenido de cada contenedor:

Contenedor fracción orgánica: Residuos orgánicos: residuos de alimentos cocinados y/o cascaras de vegetales y frutas, residuos de café e infusiones.

Contenedor multiproducto: Fracción seca, envases de plástico, latas, briks, papel y cartón usados, envases de papel y cartón, bolsas de plástico,

Contenedor residuos mixtos: Residuos de barrido, pañales y compresas, cerámica, otros objetos que no se pueden reciclar,

Contenedor de vidrio: Envases de vidrio

Los RSU y sus fracciones segregadas se recogen utilizando vehículos de transporte específicamente diseñados para este fin. La Figura 3.7 muestra algunos ejemplos de los camiones de la RRO y de los contenedores utilizados para la eliminación de los residuos.

Una vez recogidos los RSU, por la Recollida de Residus d'Osona., se transportan a una distancia de 18-20 Km desde LMR hasta diferentes destinos en función del uso final o del tratamiento aplicado en la Planta de tratamiento de Residuos de Osona, Oris. En cuanto a las fracciones multiproducto (fracción seca: papel, cartón y plástico), estas se trasladaron a la planta de triaje a una distancia de LMR de 13-15 km.

Finalmente, el vidrio, se recoge y se transporta directamente a una planta de reciclaje Centro de Mollet del Vallès - Sant Fost, donde el vidrio se limpia y se trata para fabricar nuevos productos. La Figura 3.7 muestra los sistemas de recogida y transporte de RSU y fracciones segregadas.

3.2.2. Tratamiento y aprovechamiento de los residuos

Los residuos mixtos y cada una de las fracciones segregadas de RSU se tratan de forma diferente para obtener el máximo % de aprovechamiento. A continuación, se describe el tratamiento de cada una de las fracciones recogidas:

Fracción vidrio: Esta fracción se recoge y se transporta directamente a una planta ubicada en Mollet del Vallès - Sant Fost reciclado donde el vidrio se limpia y se trata para fabricar nuevos productos.

Fracción multiproducto: Estos residuos, envases de papel, plástico y briks, se recogen conjuntamente y se separan en la Planta de triaje de Vic. Posteriormente, estos residuos son seleccionados entre: plásticos, briks, latas, papel y cartón. La planta elige los envases ligeros y el papel y cartón a partir de un circuito complejo que combina la selección manual y mecánica a fin de detectar y separar los diferentes materiales que

llegan. El objetivo de la planta es obtener unos materiales homogéneos que, una vez clasificados y prensados son almacenados. Finalmente, un recuperador autorizado lo llevará hacia su destino final, las plantas de reciclaje.

Fracción orgánica: Se composta en la planta de Orís tras ser procesada mecánicamente para conseguir abrir las bolsas de plástico y reducir el tamaño de la materia orgánica. El compostaje dura 10 semanas y una vez obtenido y tamizado el compost, se puede utilizar para jardinería o agricultura. La Figura 3.7 muestra el flujo de la fracción orgánica desde su separación en el contenedor hasta la obtención de compost.

Residuos mixtos: Aquellos que no han sido separados por el generador, en origen, llegan a la planta de tratamiento, pasando por un trómel que abre mecánicamente las bolsas y una serie de separadores de diversas tecnologías, que permiten la segregación de los metales, el aluminio, los plásticos ligeros y los envases de plástico utilizando diferentes técnicas basadas en la física (magnetismo, corriente de Foucault, sopladores, óptica). Una vez separados estos materiales, es necesario eliminar la cantidad de materia orgánica que contiene la fracción restante antes de su eliminación final mediante un tromel giratorio, el cual es posteriormente estabilizado en el Centro de tratamiento de residuos de Osona y Ripollès (CTR). Esto significa que la materia orgánica se biodegrada en condiciones similares a las establecidas para el compostaje, pero sin producir un producto de valor añadido, como es el compost. Finalmente, el material estabilizado se dispone en el Deposito controlado de residuos de Orís.

En cuanto a las fracciones multiproducto recuperados de los residuos mixtos, estas se trasladaron a la planta de Triaje, tratándose de la misma manera que la separada en la fuente. Finalmente, la fracción de residuos que no se puede valorizar incluida la materia orgánica estabilizada) o reciclar se transporta al depósito controlado vertedero de Oris. La Figura 3.7 resume las tecnologías y el tren de tratamiento implantados en la planta de Orís, donde se destinan los RSU generados y recogidos en LMR.

3.2.3. Disposición final

Por último, los vertederos y las incineradoras reciben la fracción de RSU sobrante de los tratamientos mecánicos, físicos y biológicos. En este caso, la fracción no recuperada de RSU se deposita en el vertedero de Orís, que es la mitad de los RSU mezclados tratados en la planta.

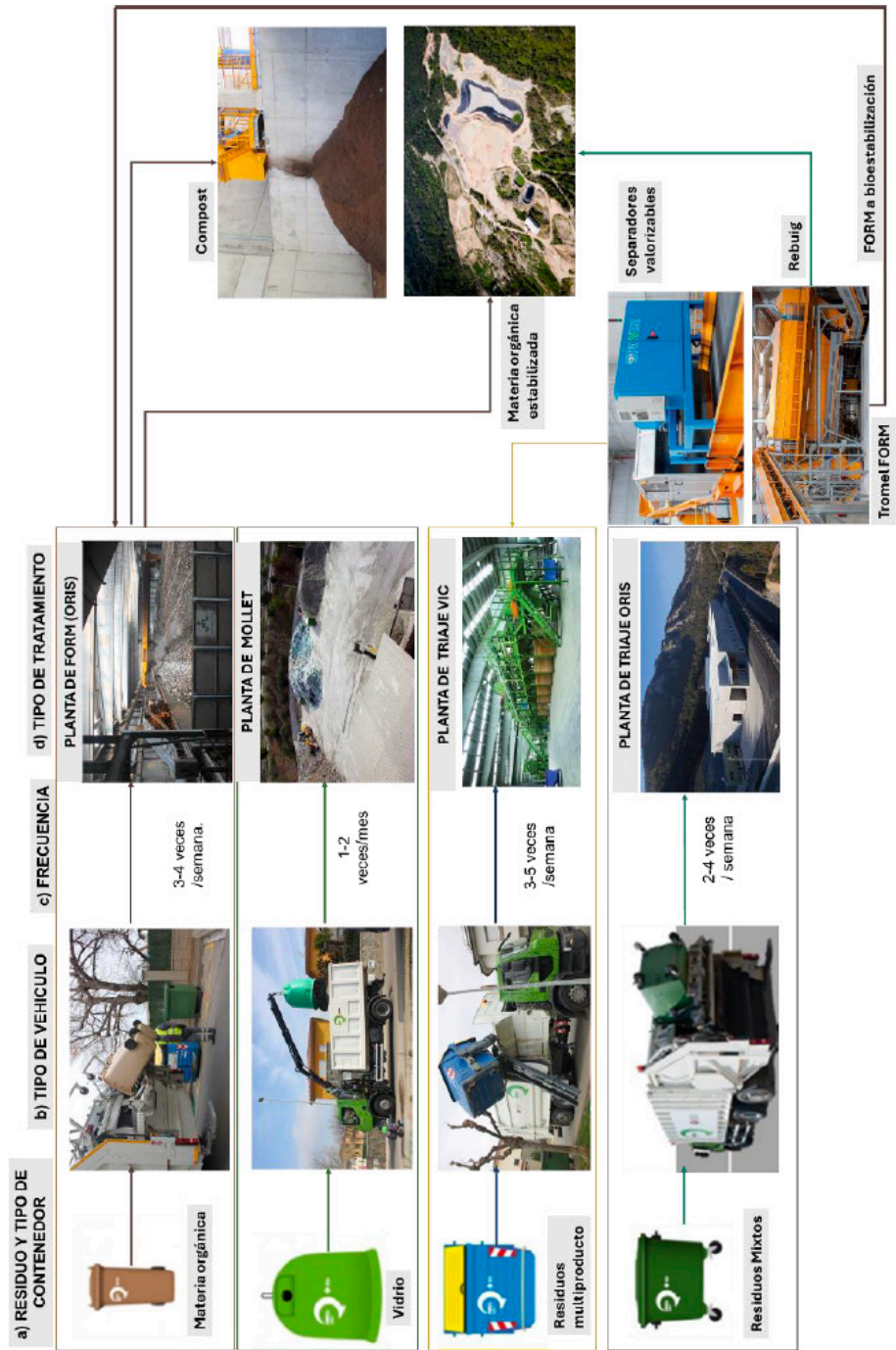


Figura 3.7. Gestión de los residuos municipales LMR modelo anterior. (a) Fracciones de residuos generadas tipo de contenedor para su recolección, (b) sistema de transporte de carga lateral o trasera según el tipo de contenedor, (c) frecuencia de recolección, (d) tipo de tratamiento por fracción y tecnología empleada. Adaptado de Planta de Oris (2024)

3.2.4. Modelo financiero anterior del sistema de gestión de la fracción orgánica

El modelo financiero previo a la implementación del compostaje descentralizado en Les Masies de Roda (LMR) se fundamentaba en una estructura de costos asociada a la recogida, transporte, tratamiento y disposición final de la fracción orgánica, bajo un esquema de gestión centralizado. En este sistema, los residuos orgánicos se recolectaban juntamente con la fracción resto y, en menor medida, con la fracción separada en origen para luego ser transportados a plantas de tratamiento y vertederos. Este modelo implicaba costes operativos elevados y generaba impactos ambientales significativos. Para calcular el impacto financiero del modelo anterior, se consideraron los siguientes conceptos: (a) enfocado a costos y (b) enfocado a la cantidad (t) del residuo generado

a) **Costos por concepto de servicio (incluye recogida, transporte, tratamiento y disposición final) actividades ejecutadas por la empresa prestadora del servicio, en este caso Recollida de Residus d' Osona- RRO Canon y Retorno de canon** (Ley, 2022).

b) **Toneladas/año generadas en el municipio LMR**

a) Los costos del modelo de gestión de residuos con SCC (C_{sc}), corresponden a los costos de recogida y transporte (C_r), costo de tratamiento (C_{tr}), costo de disposición final (C_{df}), canon de disposición de residuos (C_a) menos el retorno del canon (R_{Ca}). La ecuación 1. muestra la manera en que se relacionan estas variables en el modelo.

$$C_{ccs} = C_r + C_{tr} + C_{df} + C_a - R_{Ca} \quad \text{Ecuación 1}$$

Costo de recogida y transporte (C_r): Incluyen el servicio prestado por la empresa encargada de la recolección y el traslado de los residuos hasta las estaciones de transferencia y/o plantas de tratamiento.

Costo de tratamiento (C_{tr}): Comprende las operaciones realizadas para cambiar las características físicas, químicas o biológicas de un residuo a fin de reducir o neutralizar las sustancias peligrosas que contiene, recuperar materias o sustancias valorizables del mismo, facilitar su uso como fuente de energía o favorecer la disposición del

desperdicio. Este coste varía en función de la cantidad de fracción orgánica y el tipo de recogida (en acera y puerta a puerta).

El modelo anterior se caracterizaba por tener recolección en acera, lo que implica que la materia orgánica primero pasara por la estación de transferencia con un coste de servicio atribuido por tonelada. Posterior a la planta de transferencia, la FORM es transportada hasta la planta de tratamiento con un coste que varía según el contenido de impropios obtenidos de la caracterización de la FORM (5,01- 10,00 % impropios). Es de resaltar que, cuando la recolección es puerta a puerta es dirigida directamente a la planta de compostaje.

Los valores asignados a estas actividades son determinados mediante el convenio para la recogida y transporte de residuos establecido entre el Ayuntamiento y el Consejo comarcal de Osona.

De otro lado, aproximadamente el 50 % de la materia orgánica generada en LMR no se separaba en origen y terminaba mezclada con la fracción mixto, lo que implicaba su traslado a plantas de tratamiento mecánico-biológico (TMB)

Costo de disposición final: En última instancia, la parte de residuos orgánicos que no puede recuperarse (alrededor de un 30 % contenido en la fracción de mixtos), termina en vertederos controlados.

Canon por disposición final: La Ley 8/2008 estableció un impuesto ambiental sobre la disposición final de residuos en depósitos controlados con el objetivo de desincentivar la eliminación de residuos sin aprovechamiento. En Cataluña, este tributo ha evolucionado con la implementación del Decreto Ley 17/2022, que ajustó los valores del canon a 65,30 €/t para residuos municipales no peligrosos. Este canon incrementó la carga financiera para los municipios que no lograban una adecuada segregación en la fuente, afectando directamente a LMR, donde una proporción significativa de la fracción orgánica se encontraba en la fracción resto. En la Figura 3.8, se observa la tendencia del aumento del canon desde el año 2013. Según ENT environment & management (2020) en su documento *La efectividad de la aplicación de los cánones de residuos y su evolución*, ha supuesto dos escenarios diferentes; un primer escenario de estabilidad donde el impositivo del canon de disposición al 2035

sea el mismo que los previstos para 2024, y un escenario en que al 2035 sea de 100 €/t para el depósito controlado.

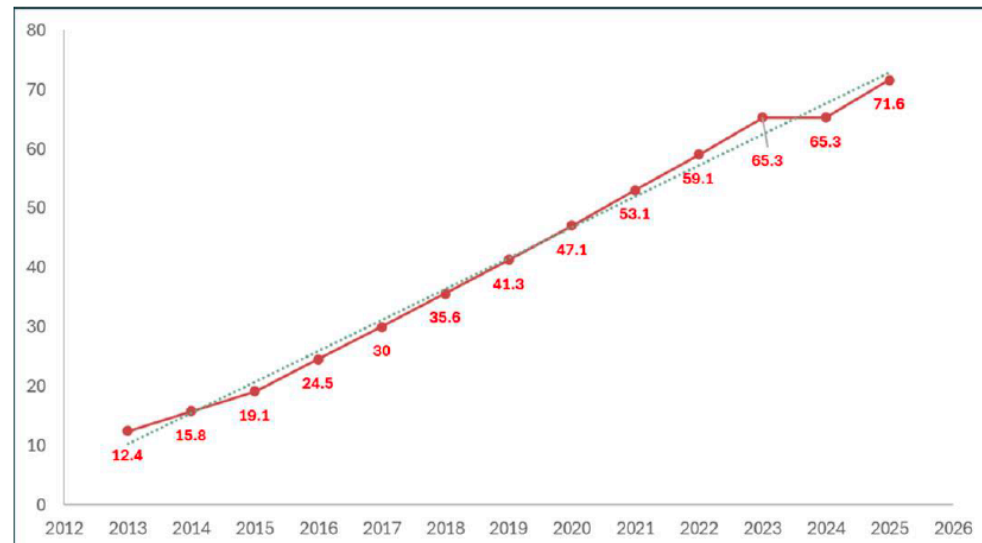


Figura 3.8. Evolución del canon de disposición.
Adaptado de (ENT environment & management, 2020)

Retorno del canon: Como incentivo a la recogida selectiva, el sistema establecía un mecanismo de retorno del canon basado en la calidad del material recogido. Para la fracción orgánica, el retorno máximo alcanzaba 34 €/t, dependiendo del porcentaje de impropios presentes en la recolección selectiva, y un adicional de 10 €/t vinculado al modelo de recogida y a la tipología del municipio. De esta manera el retorno del canon se ve afectado por el porcentaje de impropios, a mayor porcentaje de impropios menor será el retorno del canon.

Dicho lo anterior los costos del servicio para la recolección, transporte tratamiento y disposición final de la fracción orgánica se distribuían de la siguiente manera:

- 1) Costo del servicio: Los costes del modelo anterior SCC (promedio 2012 a 2017) incluían el transporte de las fracciones generadas hasta el lugar de tratamiento, así como el tratamiento y la disposición final y canon por disposición en vertedero, para un valor total de: 20.000 €. /año
- 2) Retorno del canon para la fracción orgánica: Aplicando coeficientes para el tipo de municipio (urbano, semiurbano y rural) y porcentaje de residuos

impropios el valor aproximado del retorno del canon era alrededor de: 3.000 €/año,

- 3) El coste total final de la fracción orgánica fue de: 17.000 €/año.

b) Toneladas generadas en el municipio LMR. En los años previos (2012 a 2017) a la implementación del sistema de compostaje descentralizado (SCD), aproximadamente el 60 % de la materia orgánica generada (53,75 t/año) era valorizada, mientras que el 40 % restante (35 t/año) no se aprovechaba adecuadamente, ya que entre los años 2018 y 2019 se presentó la problemática de turismo de residuos, aumentando las cantidades generadas las cuales no correspondían a la generación propia del municipio. Como se mencionó anteriormente, los costos asociados a la gestión de residuos están directamente relacionados tanto con el tipo de tratamiento aplicado como con la cantidad procesada, lo que genera variabilidad en los costos operativos y de disposición final.

En este contexto, la implementación del compostaje comunitario descentralizado buscó optimizar los costos mediante la eliminación de los gastos asociados al transporte y tratamiento en plantas externas, promoviendo la valorización in situ de la fracción orgánica y reduciendo significativamente la cantidad de residuos enviados a vertederos. Este cambio no solo trajo beneficios ambientales, sino que permitió al municipio minimizar la carga financiera derivada del sistema anterior, así como erradicar la problemática de turismo de residuos mencionada anteriormente.

Adicionalmente, En el año 2019, la Generalitat de Cataluña estableció un mecanismo de devolución del canon para la gestión de la fracción orgánica de los residuos municipales (FORM), aplicable exclusivamente a los sistemas de tratamiento basados en compostaje descentralizado (SCD). En ese momento, el valor del reembolso se fijó en 60 €/compostador (ARC, 2019). A partir del año 2022, dicho valor fue incrementado hasta alcanzar los 300 €/compostador, siempre que los municipios pudieran acreditar el tratamiento de la FORM de forma exclusiva y/o complementaria a través de estrategias de compostaje doméstico o comunitario (ARC, 2022).

Para esta investigación el nuevo modelo de gestión se basa en el retorno del canon fijado en el año 2022 (300 €/compostador).

3.3. NUEVO MODELO DE GESTIÓN

El nuevo modelo de gestión de residuos introdujo una serie de modificaciones estructurales en la recolección y tratamiento de las distintas fracciones, con el objetivo de optimizar los recursos y mejorar la sostenibilidad del sistema. Uno de los cambios más significativos fue la transición del sistema de recolección mediante contenedores en acera al modelo de recolección puerta a puerta, eliminando la acumulación de residuos en el espacio público y promoviendo una mayor responsabilidad ciudadana en la separación en la fuente.

Sin embargo, a diferencia del esquema anterior, la fracción orgánica no se recolecta puerta a puerta para su traslado a una planta de compostaje centralizada. En su lugar, se implementó un sistema de compostaje comunitario descentralizado, permitiendo el tratamiento de la materia orgánica in situ en la mayoría de los casos en las mismas áreas que se encontraban los contenedores en acera dentro del municipio. Este cambio estratégico responde a diversos beneficios operativos y ambientales:

- **Reducción de desplazamientos logísticos**, evitando el transporte de residuos orgánicos a largas distancias.
- **Disminución de costos** asociados al servicio de recolección, transporte y tratamiento de la fracción orgánica.
- Disminución de costes por el canon de disposición por separación inadecuada en la fuente, incentivando una mejor gestión doméstica de los residuos.
- **Erradicación del fenómeno del turismo de residuos**, minimizando la llegada de residuos de otros municipios a los puntos de recolección locales.

El nuevo sistema de recolección puerta a puerta entró en funcionamiento en el segundo semestre del año 2020, transformando el modelo de gestión de residuos de la siguiente manera:

Residuos recogidos puerta a puerta

- **Residuos resta:** Residuos de barrido, pañales, estropajos, pañuelos, capsulas, trapos, colillas de cigarrillos, cerámica, objetos no reciclables, excrementos de animales domésticos, zapatos no aprovechables.

- **Multiproducto:** Envases de plástico, bolsas de plástico, latas, papel aluminio, bandejas de Porex pan, espráis vacíos, tapas de metal, tetra brik, envases de cartón, papel y cartón.

Residuos contenedor en acera

- **Vidrio:** Se mantiene el uso de los **contenedores en la vía pública**, permitiendo su recolección mediante el sistema de iglús.

Compostadores comunitarios por barrio

- **Materia orgánica:** La gestión de esta fracción se realiza a través de compostadores comunitarios distribuidos por todo el municipio, donde los usuarios depositan directamente la materia orgánica en bolsas compostables. Durante el período 2020-2023, la operación y mantenimiento de los compostadores fueron gestionados por el proyecto DECOST, asegurando que el proceso de compostaje in situ se desarrollara de manera adecuada. A partir de 2023, el municipio asumió la gestión integral de estos espacios, garantizando la continuidad del sistema. Para facilitar la participación de los ciudadanos, se suministraron contenedores y bolsas específicas, como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Bolsas y contenedores para la materia orgánica

Para garantizar la viabilidad operativa del nuevo modelo de compostaje descentralizado, fue necesario realizar un dimensionamiento de los compostadores comunitarios. Este proceso consideró diversos factores, incluyendo la cantidad de

residuos orgánicos generados, capacidad de procesamiento de cada módulo y la distribución estratégica de los puntos de compostaje en función a las áreas destinadas para los contenedores en el modelo anterior, además de la densidad poblacional y la accesibilidad de los usuarios.

En la siguiente sección, se presentan los criterios técnicos utilizados para definir la ubicación, número y capacidad de los módulos de compostaje, así como los aspectos clave en su diseño e implementación dentro del municipio. En cuanto a los residuos de jardinería, como la poda y el césped, estos son recogidos por el municipio o depositados directamente por los vecinos en puntos habilitados específicamente para ello. Posteriormente, se trituran y se secaban para su utilización en el proceso de compostaje como material estructurante.

3.3.1. Dimensionamiento del sistema

La infraestructura comprende áreas de compostaje (14 en total) y un centro de post-procesamiento. El área de compostaje incluye los módulos de aportación, módulos de maduración y cajones de almacenamiento de estructurante. Las zonas de compostaje se distribuyen en los cuatro barrios del municipio: Cases Noves, Esquerda, Fontanellas y Vicenç, con un total de 58 compostadores instalados. Cada área de compostaje varía en número de compostadores (1, 3, 4, 5 o 6 módulos). La Figura 3.10 ilustra las etapas del proceso en cada una de las áreas.

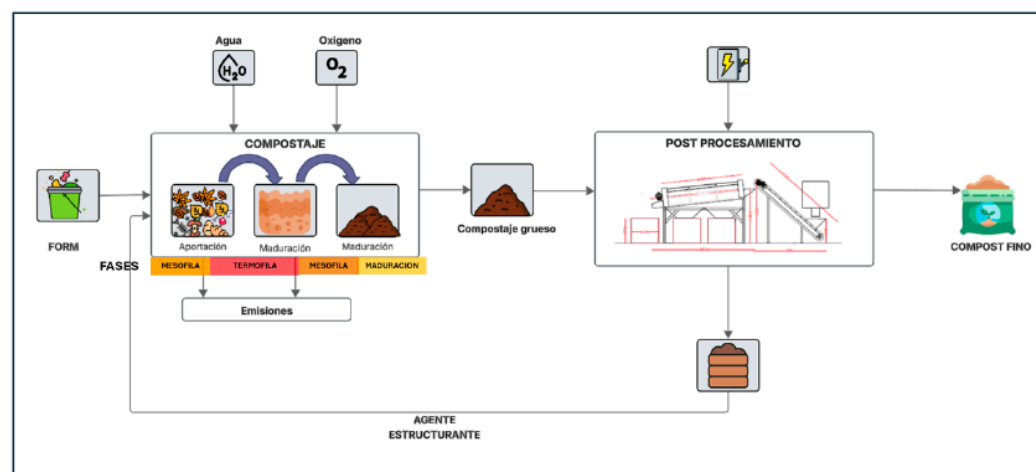


Figura 3.10. Proceso de compostaje comunitario descentralizado.

Fuente: Elaboración propia

Áreas de compostaje

Para un dimensionamiento preciso del sistema de compostaje, se consideraron tres factores clave: el ratio de aporte de FORM, y agente estructurante (AE) y el volumen según el modelo del compostador seleccionado. Estos elementos aseguran que el sistema mantenga una masa de material adecuada durante el proceso, permitiendo alcanzar condiciones óptimas de temperatura, porosidad y humedad, además de garantizar un suministro suficiente de oxígeno para la actividad microbiana.

El dimensionamiento del sistema no solo está determinado por los anteriores aspectos, sino también por el protocolo de operación y mantenimiento establecido, así como las condiciones climáticas, los cuales pueden influir en la eficiencia y estabilidad del proceso de compostaje.

Para el cálculo del número de compostadores requeridos por barrio, se aplicaron dos metodologías complementarias: la propuesta por la FAO (2013) en su *Manual de Compostaje del Agricultor* y la recogida en diversos manuales técnicos de compostaje comunitario. Ambas metodologías consideran variables fundamentales como la población servida, la cantidad de materia orgánica generada por persona al día, un ciclo operativo de 90 días, el volumen útil del compostador seleccionado y la densidad de la mezcla de fracción orgánica y agente estructurante.

La primera corresponde a la propuesta por la FAO (2013) en el *Manual de Compostaje del Agricultor*, y se expresa como la ecuación 2.:

$$V = \frac{C \times OFMSW_c \times D}{\rho} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: V es el volumen total requerido para el compostaje, C es el número de habitantes por barrio, $OFMSW_c$ es la generación diaria de residuos orgánicos por habitante (kg/hab·día), el cual se estimó entre 0.4 y 1.0 kg/hab·día, teniendo en cuenta que, un lugar de compostaje se dimensiona de forma diferente si el compostaje es obligatorio o no para la comunidad, D es la duración del ciclo de compostaje (90 días), ρ es la densidad de la mezcla de fracción orgánica y agente estructurante (0.5 kg/L).

La segunda formulación empleada, desarrollada bajo un enfoque de análisis dimensional, se presenta en la Ecuación 3. Esta expresión permite estimar el volumen total requerido para el tratamiento de la materia orgánica generada durante el ciclo de compostaje. Posteriormente, dicho volumen se divide entre el volumen útil de cada compostador con el fin de determinar el número de unidades necesarias para el sistema.

$$N = \frac{2 \times C \times OFMSWc \times D}{\rho \times Vi}$$

Ecuación 3

Donde: *N* es el número de compostadores requeridos (adimensional), *C* es el número de habitantes por barrio, *OFMSWc* es la generación diaria de residuos orgánicos por habitante (kg/hab·día), el cual se estimó entre 0.4 y 1.0 kg/hab·día, teniendo en cuenta que, un lugar de compostaje se dimensiona de forma diferente si el compostaje es obligatorio o no para la comunidad, *D* es la duración del ciclo de compostaje (90 días), *ρ* es la densidad de la mezcla de fracción orgánica y agente estructurante (0.5 kg/L).

Vi: volumen útil de cada compostador (1.000 L).

La ecuación 3 incorpora explícitamente un factor de seguridad del 100 % (multiplicando por 2), que permite asegurar la continuidad operativa del sistema ante variaciones en la generación, comportamiento del material, o retrasos operativos.

Aunque la aplicación de las dos metodologías arrojó resultados ligeramente diferentes (Tabla 3.4) —51 y 63 compostadores respectivamente— esta diferencia es aceptable dentro del margen de incertidumbre inherente a este tipo de estimaciones, especialmente cuando se trabaja con datos medios y se aplican factores de seguridad. Además, es importante destacar que el número final fue ajustado en función de la realidad operativa observada en campo, lo que resultó en la instalación inicial de 63 módulos, de los cuales 58 continúan operando de manera efectiva. Este ajuste permitió adaptar el sistema a las condiciones reales de uso, optimizando tanto la capacidad instalada como la eficiencia del proceso de compostaje descentralizado.

Tabla 3.4. Estimación del número de compostadores necesarios por barrio según distintas metodologías y número instalado

Barrio	Población (C) [hab]	N.º Compostadores (FAO 2013)	N.º Compostadores (Manuales)	N.º Compostadores Instalados
Fontanelles	160	14	12	14
Esquerda	50	5	4	3
C. Noves	200	18	14	22
Vicenç	125	11	9	14
P. Recollida	169	15	12	5
Estimación del número de compostadores necesarios por barrio		63	51	58

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ubicación y distribución

Para efectos de esta investigación, se define *polígono* como el área geoespacial delimitada que agrupa un conjunto de viviendas cuya distancia al punto de compostaje comunitario no supera los 100 metros lineales. Esta delimitación permite establecer áreas de influencia para cada compostador, facilitando el dimensionamiento y la distribución del sistema.

Esta formulación incluye tres aspectos claves:

- Delimitación geoespacial (Se realizó mediante sistemas de información geográfica (SIG).
- Número de viviendas agrupadas (criterio social-demográfico).
- Radio máximo de accesibilidad de 100 m (criterio técnico-operativo).

La ubicación de los sitios de compostaje comunitarios se determinó utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando factores clave como la disponibilidad de espacio, para lo cual se tuvo en cuenta la ubicación de los contenedores del modelo anterior (Figura 3.6) y la proximidad a los ciudadanos, con el objetivo de minimizar las distancias entre las viviendas y los puntos de compostaje. En este caso, se estableció una distancia máxima de 100 metros caminando desde cualquier vivienda hasta el compostador, optimizando así la accesibilidad para los usuarios. Teniendo en cuenta lo anterior, se llevaron a cabo los siguientes pasos para

la ubicación de las áreas de compostaje por barrio, así como la cantidad de módulos según el número de viviendas servido.

a) Integración de Datos Georreferenciados en mapas y polígonos: Los mapas georreferenciados proporcionaron los polígonos que delimitan las áreas de influencia de cada barrio. Cada polígono contiene atributos geospaciales, como es el conteo de viviendas (obtenido mediante un cruce de información con bases de datos censales y mediante análisis espacial con herramientas GIS). La Figura 3.11 presentan los mapas de asignación de áreas de compostaje por barrio.

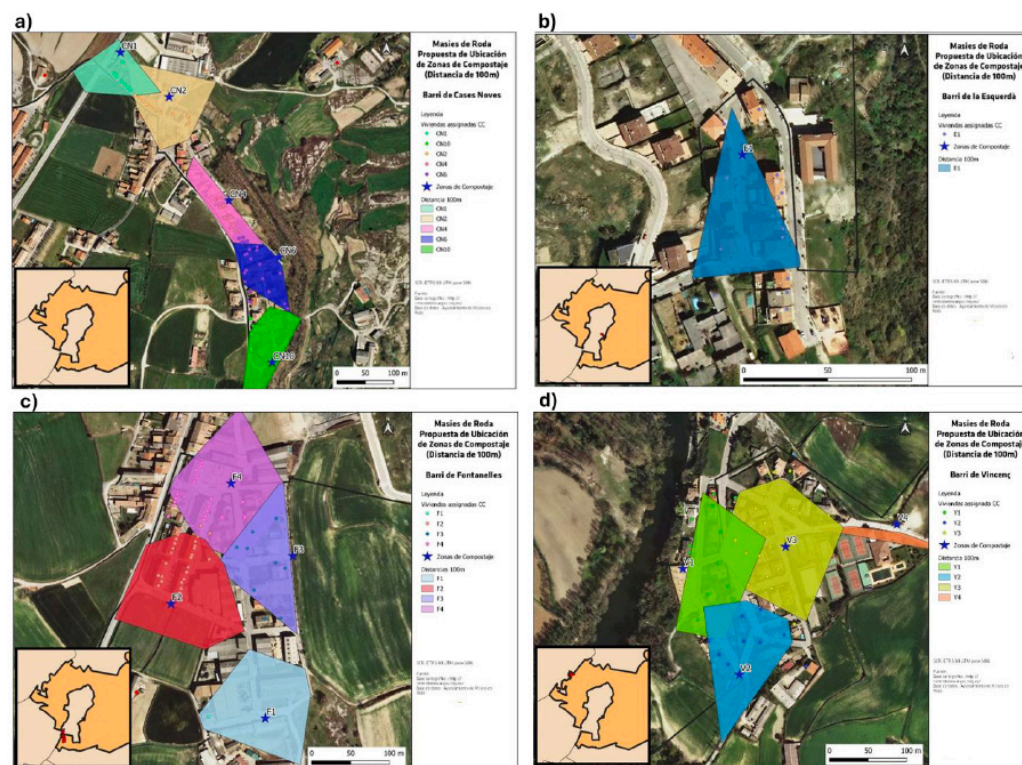


Figura 3. 11. Mapa asignación de áreas de compostaje. a). Barrio Casas Novas, b). Barrio de la Esquerda, c). Barrio Fontanelles, d). Barrio de Vicenç. Adaptado de DECOST (2021)

b) Dimensionamiento dinámico del sistema: número de módulos por área de compostaje además del enfoque de dimensionamiento descrito anteriormente, para determinar el número de módulos necesarios por área de compostaje también se consideraron parámetros específicos relacionados con la capacidad por módulo y ciclo de compostaje, así como el volumen estimado de residuos orgánicos generados

por cada polígono de viviendas. Los parámetros de entrada utilizados fueron las siguientes ecuaciones 4, 5, 6 y 7:

$$nh = \frac{pb}{Nv} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: nh es el numero promedio de habitantes por vivienda, pb es la población por barrio y Nv es el número de viviendas por polígono

$$Fhc = \frac{FORMd \times D}{\rho} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde: Fhc es la fracción orgánica por habitante y por ciclo en volumen m^3/hab , $FORMd$ es la generación diaria de 0,40 kg/hab·día durante un ciclo D es la duración del ciclo de compostaje (90 días), ρ es la densidad de la mezcla de fracción orgánica y agente estructurante ($500 \text{ kg}/m^3$).

$$Fv = nh \times Fhc \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: Fv corresponde a la aportación por vivienda, nh Número promedio de habitantes por vivienda, Fhc es la fracción orgánica por habitante y por ciclo en volumen m^3/hab

$$Av(m3) = np \times Fv \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: Av es el volumen total de residuos orgánicos por polígono, np es número de viviendas por polígono y Fv corresponde a la aportación por vivienda

Este valor representó el volumen de aportación estimado en cada área de compostaje para un ciclo de tratamiento, y permitió definir el número inicial de módulos requeridos por polígono. La distribución resultante se presenta en la Tabla 3.5.

No obstante, es importante destacar que este dimensionamiento inicial constituyó únicamente una base técnica referencial. Desde el inicio del proyecto se adoptó una estrategia operativa flexible, que consideró la evolución del sistema bajo condiciones reales de uso. A medida que se implementaba el sistema, se realizó un seguimiento continuo de la participación ciudadana, la frecuencia de utilización y los volúmenes reales de materia orgánica depositados en cada punto.

Este monitoreo permitió identificar desviaciones significativas respecto a las estimaciones teóricas, lo cual motivó la necesidad de ajustar progresivamente el número de módulos por área de compostaje. Dichos ajustes fueron fundamentados en datos empíricos y buscaban optimizar tanto la capacidad instalada como la eficiencia del proceso, evitando sobredimensionamientos o saturaciones en los puntos de compostaje.

Así, el sistema fue adaptado de forma progresiva a partir de la experiencia operativa, logrando un equilibrio entre criterios técnicos, dinámicas comunitarias y condiciones territoriales reales. La configuración final, ajustada tras varios meses de operación, se recoge en la Tabla 3.5, evidenciando la evolución desde el diseño inicial hacia una estructura optimizada.

Tabla 3.5. Diseño inicial Vs final de módulos por área de compostaje

Punto de compostaje	N.º de viviendas	Aportación por polígono (m³)	N.º de módulos por área inicial	N.º de módulos por área final
CN1 - Bar	7	1.5	3	3
CN2 - Industria	12	2.5	3	4
CN4 - Casas I	22	4.6	5	6
CN6 - Casas II	17	3.5	5	5
CN10 - Casas III	6	1.3	3	4
V1 - Casas	13	2.7	3	4
V2 - Granja	9	1.9	3	4
V3 - Tenis	17	3.5	6	6
F1 - Granja	1	0.2	1	1
F2 - Primero	23	4.8	5	5
F3 - Huerto	9	1.9	3	3
F4 - Parque	23	4.8	5	5
E1 - Esquerda	12	2.5	3	3
Pto. recogida	55	7.1	10	5

Adaptado de DECOST (2021)

La distribución inicial de los puntos de compostaje fue concebida como una propuesta piloto, que se adaptó activamente con base en la observación directa, los datos recogidos durante la operación y una filosofía de mejora continua. Este modelo,

inicialmente desconocido para la comunidad y sin antecedentes locales comparables, ha demostrado su funcionalidad y sostenibilidad, operando de manera eficiente durante más de cinco años. La Figura 3.12 muestra las variaciones en los módulos de compostaje por área.

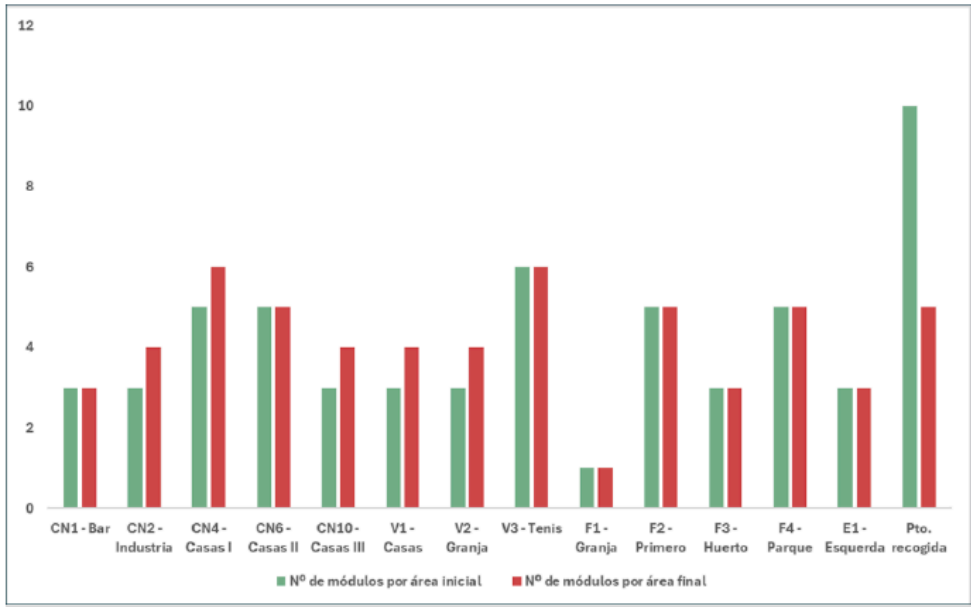


Figura 3.12. Número de módulos ajustados por área de Compostaje (diseño inicial vs adaptación final). Fuente: Elaboración propia

Capacidad instalada y validación del dimensionamiento final: Como resultado del proceso de ajuste descrito anteriormente, se consolidó un diseño final compuesto por 58 módulos de compostaje distribuidos en todos los barrios del municipio. La capacidad instalada total fue de 232 m³/año, calculada a partir de un volumen útil de 58 m³ por ciclo y considerando cuatro ciclos de compostaje anuales. Esta capacidad equivale al tratamiento de aproximadamente 116 toneladas de residuos orgánicos por año, asumiendo una densidad promedio de 500 kg/m³ (232 m³). Esta capacidad fue diseñada para acoger entre 80 y 90 toneladas anuales de materia orgánica generada por la comunidad, complementada con 10 a 25 toneladas de agente estructurante (AE) proveniente de la poda local. La Figura 3.13, permite ilustrar la ubicación de las áreas de compostaje según el número de módulos.

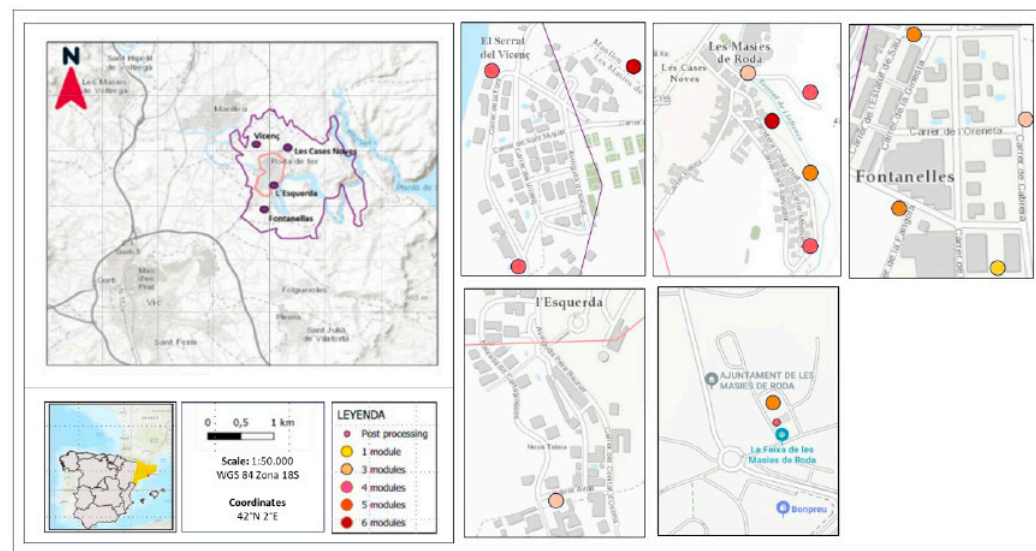


Figura 3.13. Mapa de distribución de compostadores en el Municipio LMR.
Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Adecuación del terreno

Las características del terreno representan un aspecto clave en la implementación efectiva del sistema de compostaje, especialmente en lo que respecta al manejo de lixiviados. Por esta razón, además de definir la estrategia de gestión del material en cada sitio de compostaje, es esencial establecer un protocolo de preparación del terreno que garantice condiciones adecuadas para la instalación de los compostadores.

Los terrenos más adecuados para la instalación de sistemas de compostaje comunitario son aquellos no pavimentados y con una superficie plana, lo que facilita la infiltración del agua y el drenaje natural. Antes de la instalación de los compostadores, el suelo debe ser nivelado, compactado y recubierto con un material percolador resistente, que permita la adecuada filtración de líquidos y prevenga encharcamientos.

La gestión de lixiviados en el compostaje comunitario se basa en tres estrategias principales: prevención, diseño adecuado de drenaje y tratamiento del líquido generado. En este sistema, se implementaron bases drenantes compuestas por filtros naturales de grava y arena, con un espesor de 0,15-0,20 m, dispuestos bajo los compostadores. Este diseño permite mejorar la infiltración del agua y minimizar la acumulación de

lixiviados, reduciendo el riesgo de contaminación del suelo y de aguas superficiales. La Figura 3.14, ilustra el proceso de preparación del terreno para el acondicionamiento del área de compostaje, incluyendo la nivelación y las partes instaladas como las bases drenantes.

Figura 3.14 (a): Instalación del Pavimento Permeable, realizado por operarios con equipos de construcción. Este pavimento permite la infiltración de agua y facilita el drenaje de los lixiviados generados en el proceso de compostaje.

Figura 3.14 Parte (b): Se presenta un detalle del pavimento de celosía tipo Paviporcel, un material prefabricado de hormigón diseñado para soportar cargas y al mismo tiempo permitir la filtración del agua, evitando encharcamientos y facilitando la absorción de líquidos.

Figura 3.14. Parte (c): Esquema de las Capas del Terreno:

- 1) Capa superior: Representa la cobertura de tierra vegetal cribada y sembrada, que ayuda a la integración del sistema con el entorno.
- 2) Pavimento de celosía: Superficie estable que facilita la infiltración del agua y brinda soporte estructural.
- 3) Base de arena: Capa de arena fina de 0,05 m que proporciona estabilidad y nivelación al pavimento.
- 4) Subbase de grava: Capa de 0,20 m que actúa como un filtro natural, facilitando el drenaje y evitando acumulaciones de lixiviados.

Este sistema estructural garantiza la durabilidad y funcionalidad del área de compostaje, promoviendo una gestión eficiente de residuos orgánicos y evitando problemas asociados a la acumulación de líquidos.

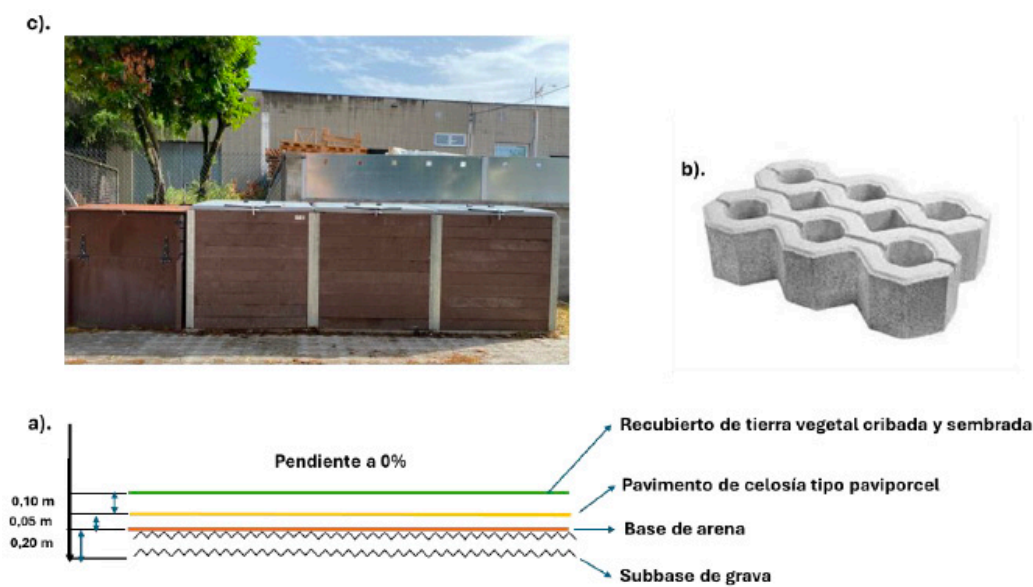


Figura 3.14. Preparación del terreno para la instalación del área de compostaje. (a) Esquema de las Capas del Terreno, (b): Pavimento de Celosía Tipo Paviporcel, (c): Adecuación del terreno e instalación del pavimento. Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Dimensionamiento y Construcción de áreas de compostaje comunitario descentralizado

Para la construcción de las áreas de compostaje, fue necesario contar con el espacio suficiente para ubicar las islas de compostadores, además del lugar de almacenamiento del estructurante. El compostador seleccionado para este sistema consiste en un compostador modular ya que este diseño es flexible en el sentido que permite montar las islas de compostadores modulares desde 3 módulos, en donde se llevaran a cabo los procesos de aportación de FORM y maduración. Frente al almacenamiento del agente estructurante (AE), el diseño contempla las dimensiones del área de compostaje, así como una vista de un módulo de compostaje y la construcción de un cajón que se ubica al lado de las áreas de compostaje, tal y como se observa en la Figura 3.15.

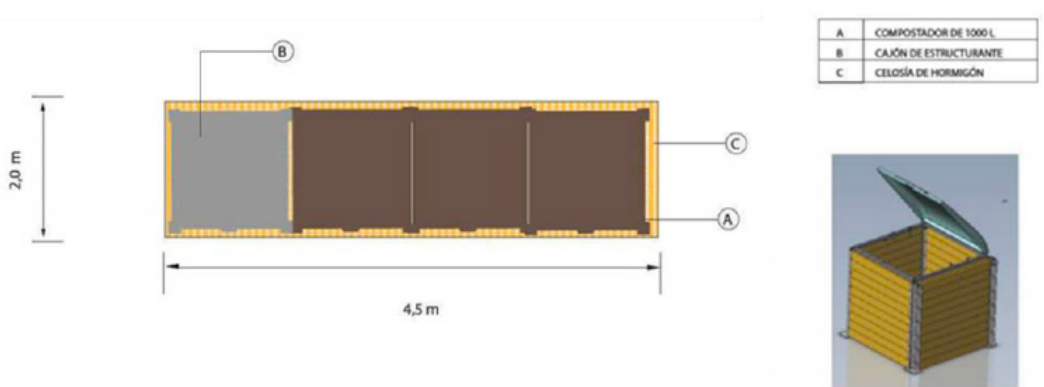


Figura 3.15. Dimensiones áreas de compostaje. Fuente: Vermican (2024)

Módulo de Aportación: El módulo de aportación es el punto inicial del proceso de descomposición de la materia orgánica. En esta etapa, la mezcla se mantiene en condiciones mesófilas, favoreciendo la activación de los microorganismos responsables del inicio de la degradación. A medida que la materia orgánica alcanza una masa crítica, la temperatura aumenta progresivamente, iniciando la fase termófila, donde se produce la mayor degradación y estabilización del material. Este diseño no solo optimiza la eficiencia del compostaje, sino que también ayuda a conservar la humedad, reducir la proliferación de mosquitos y otros vectores y garantizar un proceso más higiénico y controlado. En cuanto a la cantidad de módulos requeridos, se estableció que, en islas de 3 módulos, se requiere 1 módulo de aportación, mientras que, en islas con más de 3 módulos, el número aumenta a 2 módulos de aportación, garantizando así una gestión equilibrada y eficiente del proceso de compostaje.

Módulos de Maduración: Estos módulos consecutivos permiten trasladar el material en descomposición, asegurando una oxigenación uniforme y reactivando el proceso biológico en cada transferencia, lo que evita la formación de zonas anaeróbicas. Durante la primera semana después del transvase de la FORM desde el módulo de aportación al módulo de maduración, se observa una fase termófila, en la cual la actividad microbiana alcanza su punto máximo. Posteriormente, la temperatura comienza a descender, dando paso a la fase mesófila, en la que el compost continúa su proceso de estabilización. Esta práctica mejora la actividad biológica y, por tanto, la temperatura, que es fundamental para asegurar la higienización de posibles patógenos,

así como la inactivación de semillas viables. En términos del dimensionamiento de los módulos de maduración, en islas de 3 módulos, se requieren 2 módulos de maduración, mientras que, en islas más grandes, este número puede oscilar entre 2 y 3, dependiendo del volumen de material a procesar. El último módulo de maduración tiene como principal objetivo garantizar una mayor estabilidad del compost final, alargando la fase de maduración se asegura que el producto resultante cumpla con los parámetros de calidad necesarios para su aplicación en suelos o cultivos.

Los módulos de compostaje utilizados en las áreas de compostaje comunitario están diseñados con un enfoque en la eficiencia térmica, la durabilidad y la sostenibilidad. Están fabricados con un 80 % de plástico reciclado postconsumo, lo que no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también proporciona resistencia estructural y aislamiento térmico. El espesor de sus paredes (3 cm) favorece la conservación de la humedad y la estabilidad de la temperatura interna, condiciones esenciales para la actividad microbiana en el proceso de compostaje, además de minimizar la proliferación de insectos y otros vectores no deseados.

La configuración modular de estos compostadores permite su adaptación a distintos contextos operativos, desde unidades individuales hasta sistemas integrados de múltiples módulos, facilitando la escalabilidad del proceso en función del volumen de residuos orgánicos generados y de la participación comunitaria.

Adicionalmente, los módulos están equipados con una tapa de fibra de vidrio o plástico reciclado, materiales que combinan ligereza y resistencia mecánica, permitiendo su apertura en ángulos de 45° y 90°, lo que optimiza las operaciones de mantenimiento y carga de residuos. Para garantizar su durabilidad en condiciones ambientales variables, incorporan componentes metálicos galvanizados en caliente, lo que les confiere una alta resistencia a la corrosión y una mayor vida útil en entornos de exposición prolongada.

Cajones para el almacenamiento de AE: El cajón estructurante de 1200 litros está diseñado para almacenar y gestionar el material estructurante en sistemas de compostaje comunitario, permitiendo mantener un suministro adecuado de material seco para regular la humedad y la aireación del compost. Su estructura, fabricada con plástico reciclado, proporciona resistencia y funcionalidad en entornos de uso continuo. Con unas dimensiones de 120 x 120 cm, el diseño del cajón incluye una apertura frontal

que facilita el acceso al material y su dosificación en las distintas etapas del proceso de compostaje. Además, cuenta con una apertura superior que permite la carga directa de big bags, facilitando la reposición del estructurante y reduciendo la necesidad de manipulación manual. Estas características favorecen una gestión más eficiente de los recursos en los espacios de compostaje comunitario.

El sistema de compostaje comunitario cuenta con una estructura modular diseñada para optimizar la gestión de los residuos orgánicos y facilitar su mantenimiento. La Figura 3.16 muestra los principales componentes estructurales del sistema:



Figura 3.16. Partes del sistema de compostaje. (1), estructura de hierro galvanizado (2), Paneles laterales modulares con tablas removibles (3), Tapa con apertura asistida (4), Base drenante con rejillas plásticas (5), Malla anti-ratones (6). *Adaptado de DECOST (2021)*

- Tablas removibles (1): Permiten el acceso al interior del módulo, facilitando la extracción y el volteo del compost en diferentes etapas del proceso.
- Estructura de hierro galvanizado (2): Proporciona soporte y estabilidad al sistema, asegurando su resistencia a condiciones ambientales adversas y prolongando su vida útil.
- Paneles laterales modulares (3): Fabricados con material reciclado, contribuyen al aislamiento térmico del sistema, manteniendo condiciones óptimas para el proceso de compostaje.
- Tapa con apertura asistida (4): Facilita la manipulación del material orgánico, permitiendo una adecuada aireación del compost y reduciendo la proliferación de insectos y la emisión de olores.
- Base drenante con rejillas plásticas (5): Favorece la evacuación controlada de lixiviados, evitando acumulaciones excesivas de humedad y asegurando una correcta aireación del material compostado.
- Malla antirratones (6): Evita el acceso de ratones por la parte inferior de los compostadores. Las figuras 3.17 y 3.18 muestran las áreas de compostaje instaladas.



Figura 3.17. Ejemplo área de compostaje instalada. Módulo de aportación (A), el primer módulo de maduración (B1), segundo módulo de maduración con rollcontainer en su interior (C), cajón de estructurante. *Adaptado de DECOST(2021)*



Figura 3.18. Tipos de áreas de compostaje instaladas. (a) Isla seis módulos de compostaje, (b) área en fila seis módulos de compostaje (c) área de cinco módulos de compostaje, (d) área de cuatro módulos, (e) área de tres módulos de compostaje. *Adaptado de DECOST (2021)*

3.3.5. Dimensionamiento y Construcción de área de postprocesamiento

Para la fase de post procesamiento del compost generado en los módulos de compostaje comunitario, se utilizaron equipos especializados que permiten el tamizado, transporte y manejo del material estabilizado. A continuación, la Figura 3.19 se describen los equipos utilizados:

- Polipasto Eléctrico
- Cinta Transportadora
- Trómel de Tamizado

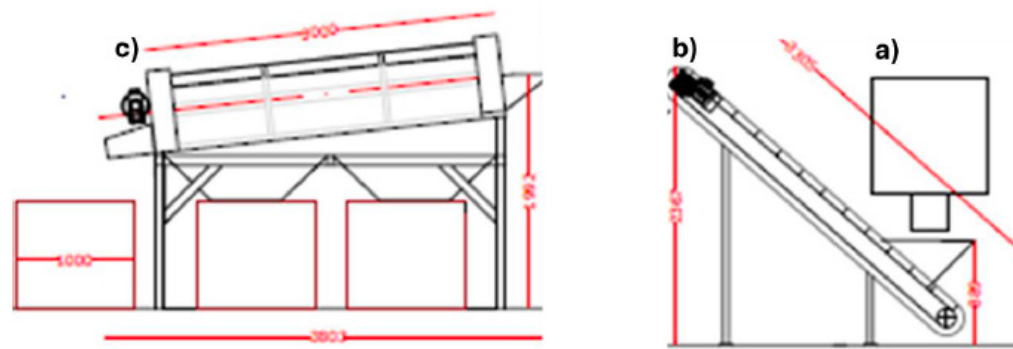


Figura 3.19. Equipos instalados área de post-procesamiento. a). Polipasto eléctrico, b). Cinta transportadora, c). **Trómel de tamizado.** *Adaptado de DE COST (2021)*

Los equipos mencionados en la Figura 3.19 fueron adquiridos a través de Talleres Salo S.L., empresa especializada en la fabricación de maquinaria para el tratamiento de residuos. La Tabla 3.6 resume sus principales especificaciones.

Tabla 3.6. Especificaciones técnicas equipos área de post-procesamiento

Equipo	Modelo	Peso (kg)	Potencia (kW)	Motor (RPM)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Velocidad de salida (RPM)
Polipasto eléctrico	CTCCG33040		0.2	N.A	380	50	
Cinta transportadora	CTCCG33040	165	0.75	1500	230/400	50	60
Trómel de tamizado	300CP	725	1.10	1500	230/400	50	60

Adaptado de DECOST (2021)

El post procesamiento del compost generado en el sistema de compostaje comunitario se lleva a cabo mediante un conjunto de equipos diseñados para tamizar, clasificar y preparar el compost para su uso final. Este proceso inicia con la manipulación del big bag de compost maduro, sostenido por un polipasto eléctrico, y finaliza con la clasificación del material en tres fracciones de tamaño. A continuación, se detalla cada etapa del proceso:

- 1) Apertura del Big Bag y Descarga del Compost: El compost estabilizado, almacenado en big bags, es trasladado mediante un polipasto eléctrico de cadena, que lo mantiene suspendido en la posición adecuada para su vaciado. La descarga se realiza mediante una apertura inferior controlada

del big bag, permitiendo un flujo uniforme del material hacia la tolva de recepción que alimenta la cinta transportadora, evitando esfuerzos manuales y mejorando la seguridad en la operación. La figura 3.20 muestra el sistema de polipasto eléctrico utilizado en el área de postprocesamiento del compost, el cual facilita la manipulación y descarga del material tamizado.

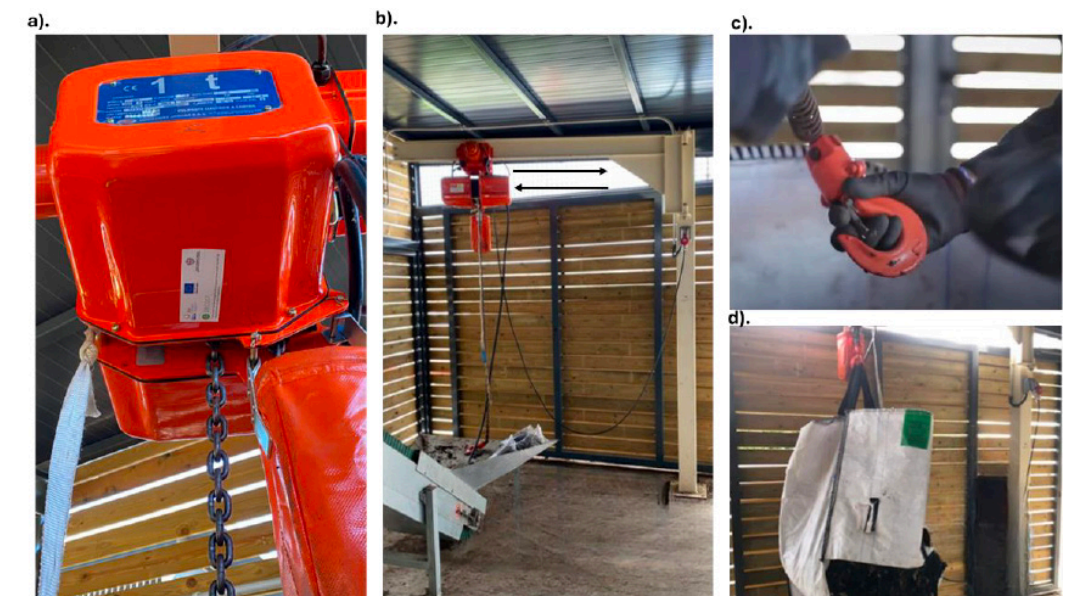


Figura 3.20. Sistema de elevación y descarga del compost área de Post-procesamiento
(a) polipasto eléctrico, (b) Tren de movimiento del polipasto, permitiendo el adecuado posicionamiento del big bag bajo la tolva (c) Gancho y sistema de elevación, (d) Mecanismo de enganche, que asegura la correcta fijación de los big bags. *Adaptado de DECOST (2021)*

- 2) Transporte del Compost a través de la Cinta Transportadora: Una vez descargado en la tolva de recepción, el compost es transportado mediante una cinta transportadora de accionamiento eléctrico. Este sistema permite el desplazamiento continuo del material hacia la siguiente etapa del proceso, asegurando un flujo constante y eficiente del compost tamizado. La Figura 3.21 ilustra el funcionamiento del equipo, sistema de transporte y alimentación del compost dentro del área de postprocesamiento, donde el material es transferido desde los big bags hasta la fase de tamizado.



Figura 3.21. Cinta transportadora. (a) vista de la cinta transportadora, (b) Proceso de descarga del big bag hacia la tolva de alimentación de la cinta transportadora. Adaptado de DECOST (2021)

3) **Tamizado del Compost en el Tromel:** El material transportado es introducido en el tromel de tamizado, un cilindro rotativo perforado que separa el compost en tres fracciones según su granulometría, permitiendo la obtención de un material homogéneo.

- Compost fino: Material completamente estabilizado y listo para su aplicación como enmienda orgánica.
- Compost grueso: Material con partículas de mayor tamaño.
- Estructurante: Fragmentos de material seco de mayor tamaño (como restos de ramas o astillas de madera), que pueden ser reutilizados como agente estructurante en nuevos ciclos de compostaje.
- El diseño del tromel permite una clasificación eficiente, facilitando la reintroducción del material estructurante en el sistema y optimizando el aprovechamiento del compost producido.

La Figura 3.22 ilustra las partes del equipo que permite que el proceso de tamizado se lleve a cabo, donde el material es separado según su granulometría para optimizar su uso.

- 1) Vista del tromel de tamizado (a), equipo encargado de separar el compost en diferentes fracciones según su tamaño. El compost es transportado desde la cinta alimentadora hasta el tromel, donde se filtra y clasifica en diferentes compartimentos.
- 2) Salida del estructurante (b) desde el tromel hacia el big bag, que se encuentra en la salida trasera del tromel.
- 3) Productos con granulometría fina: Compost fino obtenido (c) para su uso, resultado del proceso de tamizado. Este material puede aplicarse como compost orgánica en suelos agrícolas y huertos urbanos.
- 4) Estructurante (d): Material grueso almacenado en big bags. Este material puede reintegrarse al proceso como estructurante en nuevas cargas de compostaje o utilizarse en otras aplicaciones orgánicas.



Figura 3.22. Tromel. (a) Vista del tromel y sus salidas laterales para el compost, (b) Salida trasera del estructurante, (c) compost fino tamizado (b) estructurante almacenado en big bag para reintegrar en el proceso. Adaptado DECOST (2021)

Finalmente, todos los equipos del área de post procesamiento se encuentran en una caseta que cuenta con suministro eléctrico para el funcionamiento de los equipos, la Figura 3.23 muestra una vista exterior e interior del área.

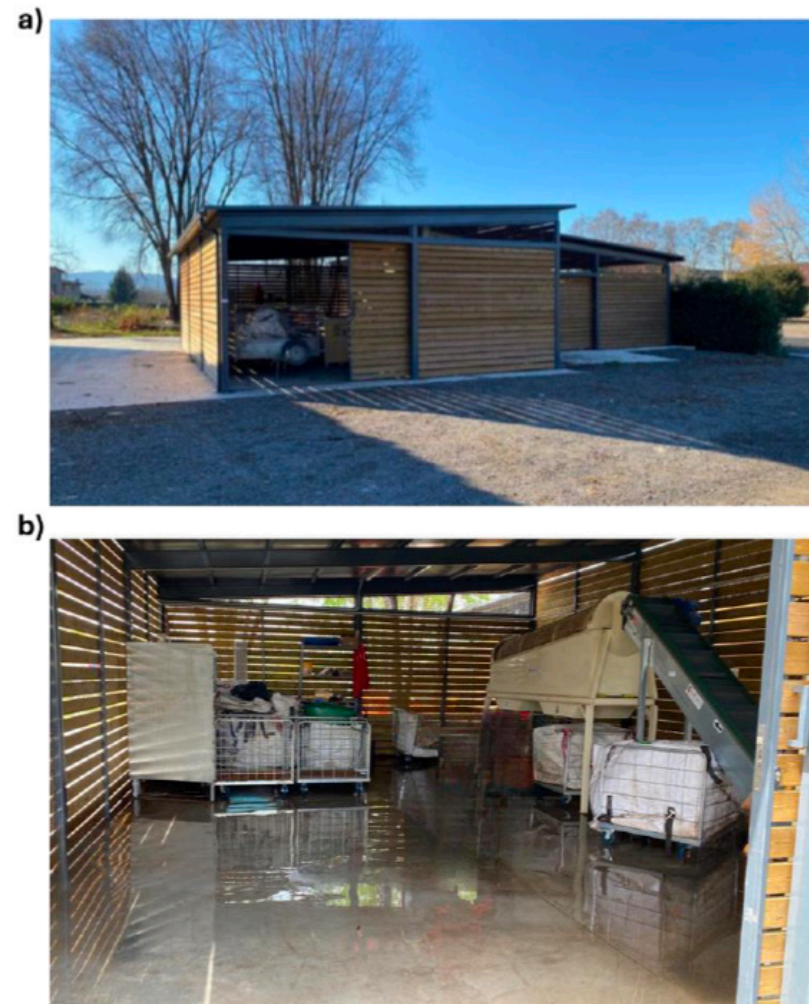


Figura 3.23. Infraestructura del área de Post-procesamiento del Compost (a) vista exterior, (b) visualización del interior. Adaptado de DECOST (2021)

La Figura 3.23 muestra las vistas del área de postprocesamiento:

- a) Vista exterior del área de postprocesamiento: Una estructura diseñada con paneles de madera y estructura metálica, que proporciona protección contra las condiciones climáticas y facilita la operación del sistema. Este espacio permite la manipulación del compost tamizado y el almacenamiento de materiales.

- b) Interior del área: Equipo de tamizaje y almacenamiento del compost. Se aprecian big bags con compost tamizado, la cinta transportadora y un trómel de clasificación, que permiten separar el compost en diferentes fracciones según su tamaño.

Este espacio está diseñado para optimizar el tratamiento final del compost, asegurando un ambiente controlado y facilitando la logística de almacenamiento y distribución del material resultante.

Con base en los criterios técnicos de dimensionamiento y las condiciones específicas de cada barrio, se definió la cantidad de compostadores a instalar en el municipio, así como la infraestructura mínima necesaria para el área de postprocesamiento. Una vez establecido el sistema físico y su distribución, resulta fundamental garantizar el funcionamiento continuo y eficiente del proceso de compostaje, lo cual depende directamente de una adecuada operación y mantenimiento.

3.4. ESCENARIOS OPERATIVOS

Uno de los aspectos operativos clave es la provisión de oxígeno al sistema, indispensable para mantener las condiciones aeróbicas necesarias durante todo el ciclo de descomposición. Para ello, se implementa la técnica del transvase, que consiste en el traslado periódico del material orgánico entre módulos con el fin de reactivar la actividad microbiana, evitar zonas anaerobias y mejorar la homogeneización del proceso.

Este apartado presenta los principios y procedimientos aplicados en la operación y mantenimiento del sistema de compostaje comunitario. Cabe señalar que en la sección de resultados técnico-operativos se profundiza en cómo estas prácticas, incluida la frecuencia y modalidad del transvase, fueron ajustadas progresivamente a partir de la experiencia en campo y la aplicación de diversos escenarios de operación.

3.4.1. Escenarios de operación SDC

La operación de las áreas de compostaje se realizó durante tres años de estudio, clasificándose en tres grupos distintos (1, 2 y 3), denominados escenarios:

- Escenarios 1A y 1B, caracterizados por un proceso manual con dos transvases.
- Escenarios 2A y 2B, clasificados como semi-manuales con un único transvase.
- Escenarios 3A y 3B, con una operación mecanizada y sin transferencia de materia orgánica entre unidades de compostaje.

Cada escenario se describe en detalle en el Capítulo 4. Sección I Resultados técnico-operativos.

Paralelamente a la operación del sistema de compostaje comunitario, y bajo distintos escenarios de gestión, se llevó a cabo un seguimiento ambiental con el objetivo de evaluar la sostenibilidad del modelo descentralizado. Para ello, se analizaron indicadores ambientales centrados en dos enfoques principales: por un lado, los análisis fisicoquímicos y biológicos del compost, que permitieron valorar la calidad del producto final y la eficacia del proceso; y por otro, el cálculo de la huella de carbono, como herramienta para estimar el impacto del sistema en términos de emisiones evitadas. Las metodologías aplicadas para el análisis de estos indicadores se detallan a continuación.

3.5. ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS, INDICADORES AMBIENTALES

La caracterización física, química y biológica de las muestras de compost obtenidas en LMR se realizó por triplicado. Los análisis de Sólidos Totales (TS) y Volátiles (VS), humedad, contenido de materia orgánica y Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN) fueron determinados según los métodos estándar del Consejo de Compostaje de los EE. UU., *Test methods for the examination of composting and compost (TMECC)*, (2015) y. En cuanto a la estabilidad biológica del compost se evaluó mediante la prueba respirométrica dinámica según Salas (2010).

Por otro lado, los macroelementos (K y P) y los metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg y Zn) fueron analizados mediante Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES, método C5110228). Asimismo, la cuantificación de microorganismos (bacterias, hongos y actinomicetos) fue realizada en un laboratorio acreditado, encargado de la subcontratación de estos análisis.

3.5.1. Determinación del contenido de humedad y materia seca

Para la cuantificación del contenido de humedad (MC) y materia seca (MS) de las muestras orgánicas, se empleó un método gravimétrico. Las muestras sólidas fueron colocadas en crisoles cerámicos previamente tarados y sometidas a un secado en estufa a una temperatura constante de 105 °C durante un mínimo de 24 horas, hasta alcanzar peso constante. La pérdida de masa entre el peso inicial (muestra fresca) y el peso final (muestra seca) permitió calcular el contenido de humedad utilizando la Ecuación 8. Posteriormente, el valor de MC se utilizó para estimar el contenido de materia seca mediante la Ecuación 9. Este procedimiento se aplicó por triplicado para cada muestra, asegurando la representatividad y repetibilidad de los resultados.

$$MC (\%) = \frac{(w_f - w_d)}{(w_f - w_c)} * 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$MS (\%) = 100 - MC (\%) \quad \text{Ecuación 9}$$

En la Ecuación 8, el contenido de humedad (MC, %) representa la proporción de agua presente en la muestra orgánica. Los parámetros utilizados para su cálculo son: el peso de la muestra fresca (W_f), el peso de la muestra tras el secado (W_d), y el peso del crisol vacío (W_c). A partir del valor obtenido de MC, se deriva el contenido de materia seca (MS, %) según la Ecuación 9.

Adicionalmente, para las mezclas iniciales compuestas por diferentes materias primas, el contenido de humedad se estimó mediante un balance de masas, considerando las propiedades individuales de cada componente. Esta aproximación se consideró más precisa dada la elevada heterogeneidad de las mezclas, proporcionando una representación más fiel de su comportamiento inicial en el proceso de compostaje.

3.5.2. Determinación de sólidos volátiles

Una vez completado el secado a 105 °C, las muestras se sometieron a calcinación en un horno de mufla (modelo ELF 11/14B, Carbolite, Reino Unido) a 550 °C durante un período de 5 horas. Esta temperatura garantiza la combustión completa de la materia orgánica, permitiendo diferenciar entre la fracción volátil (orgánica) y la fracción inorgánica (ceniza).

El contenido de sólidos volátiles (VS, %) se calculó con base en la diferencia entre el peso de la muestra seca (Wd) y el peso residual tras la combustión (ceniza, Wash), teniendo en cuenta también el peso del crisol vacío (Wc), según lo establecido en la Ecuación 10. Este parámetro es fundamental para evaluar el grado de biodegradabilidad del material, ya que representa la proporción de materia orgánica potencialmente susceptible de descomposición biológica.

$$VS (\%) = \frac{(W_d - W_{ash})}{(W_d - W_c)} * 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

3.5.3. Determinación de pH y conductividad eléctrica

Para la medición del pH y la conductividad eléctrica (CE) de las muestras sólidas, se preparó una suspensión en una relación 1:5 (masa:volumen) utilizando agua desionizada como medio de extracción. Tras una agitación constante durante 20 minutos, se permitió la sedimentación de sólidos por un periodo adicional de 30 minutos. Las mediciones se realizaron en el sobrenadante, que contenía las sales y iones solubilizados durante el proceso.

El valor de pH fue determinado mediante un medidor específico (Cyberscan Ion 510, XS-Instruments, Italia), mientras que la CE se evaluó con un conductímetro eléctrico (Cond-510, XS-Instruments). Estos parámetros son indicativos de la solubilidad de compuestos iónicos en el compost, y permiten inferir tanto el grado de descomposición como la posible fitotoxicidad del material resultante.

3.5.4. Determinación de compuestos nitrogenados: Nitrógeno total Kjeldahl (TKN)

En el caso del nitrógeno total Kjeldahl (TKN), se llevó a cabo una digestión previa de las muestras utilizando ácido sulfúrico concentrado (65 %) y un catalizador, a 400 °C durante 2 horas, en un bloque digestor (Block Digest 20, J.P. Selecta S.A.). Esta digestión convirtió el nitrógeno orgánico y el amoniacal en formas susceptibles de ser destiladas y valoradas mediante el mismo procedimiento aplicado al NH_4^+ . La cantidad de ácido consumido en la titulación permitió calcular la concentración total de nitrógeno en la muestra.

Este análisis proporciona una visión integral del contenido nitrogenado del compost, indicador clave de su valor fertilizante y de su grado de estabilización biológica.

3.5.5. Evaluación de la actividad biológica: Prueba respirométrica dinámica

La estabilidad biológica del compost fue evaluada mediante una prueba respirométrica dinámica (Figura 3.24), técnica que permite cuantificar la biodegradabilidad del material orgánico a partir del consumo de oxígeno en condiciones aeróbicas controladas. Se empleó un respirómetro dinámico con un volumen de trabajo de 500 mL, operado a una temperatura constante de 37 °C. El sistema fue alimentado con un flujo continuo de aire (20 % O_2) regulado mediante controladores de masa (Mass-Stream, Bronkhorst, Países Bajos), en un rango de 10 a 200 mL/min, tras haber sido humedecido previamente.

Los gases de salida fueron deshumidificados y el contenido de oxígeno residual fue medido utilizando sensores electrónicos (O2-A2 Oxygen Sensor, Alphasense, Reino Unido). La adquisición y registro de datos se realizó mediante un sistema Arduino UNO (Arduino, Italia), con software de desarrollo propio implementado en LabVIEW 2017 (National Instruments, EE. UU.).

El parámetro principal determinado fue el Índice Respirométrico Dinámico (DRI), que expresa el consumo de oxígeno promedio ($\text{mg O}_2/\text{h}\cdot\text{kg VS}$) durante el periodo de máxima actividad microbiana. Este índice se calcula aplicando la Ecuación 11, que considera el flujo de aire, la diferencia de concentración de oxígeno entre entrada y salida, y la masa de sólidos volátiles (VS) presentes en la muestra.

$$DRI \left(\text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{h}\cdot\text{kgVS}} \right) = Q * \frac{(O_{2i} - O_{2o}) * 31.98 * 60}{22.4 * W_{VS}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde DRI es el índice respirométrico dinámico en mg de O_2 por hora y por kg VS analizado, Q es el flujo de aire suministrado (Lmin^{-1}), O_{2i} y O_{2o} son los contenidos de oxígeno en el aire de entrada y salida (fracción molar), respectivamente, $31.98 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ es el peso molecular del O_2 , $60 \text{ min}\cdot\text{h}^{-1}$ minutos a hora factor de conversión, $22.4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$ es el valor del volumen molar de aire en condiciones normales y W_{VS} es el peso de VS introducido en cada uno reactor biológico.



Figura 3.24. Respirometrías dinámicas del compost obtenido (a) Compost obtenido posterior a su tamizado, (b) muestra analizada en la laboratorio, (c) Equipo Respirómetro. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se calculó el consumo acumulado de oxígeno en cuatro días (AT_4), que representa la cantidad total de oxígeno consumido durante los primeros días de mayor actividad biológica. Este indicador, determinado mediante la Ecuación 12, ofrece una estimación del grado de estabilización de la fracción orgánica y es clave para valorar la madurez del compost.

$$AT_n = \int_{t_1}^{t_1+n} DRI_t dt \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde AT_n es el consumo de oxígeno acumulado en n período (siendo generalmente este período de 4 días), t_1 es el tiempo en el que finaliza la fase de retraso, t_1+n es el período en el que se pretende medir el consumo de oxígeno acumulado.

3.5.6. Muestreo y análisis de emisiones gaseosas

El monitoreo de emisiones gaseosas se realizó con el objetivo de cuantificar los impactos ambientales del sistema de compostaje, especialmente en relación con gases de efecto invernadero (GEI) y compuestos odoríferos. Las emisiones incluyeron, metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), amoníaco (NH_3), y unidades de olor (UO).

Las muestras se recolectaron directamente en los compostadores (Figura 3.25). Para ello, se emplearon dos estrategias complementarias:

- En el caso de los GEI, las muestras gaseosas fueron capturadas en bolsas de Nalophan® de 10 L mediante bombas de vacío conectadas a cámaras herméticas o de flujo. Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el cromatógrafo de gases SCION 456-GC, equipado con detectores específicos para la cuantificación precisa de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Este análisis permitió determinar las concentraciones de estos gases clave en la evaluación de la huella climática del sistema.
- Para la determinación in situ de NH_3 , se utilizó un analizador portátil MultiRAE Lite, cuya bomba de muestreo se conectó a una cámara de fundente acoplada a la línea de salida de gases. En casos donde las concentraciones superaron los límites del dispositivo —especialmente durante la fase termófila— se aplicaron diluciones mediante inyección de aire limpio a caudal controlado.
- La medición de unidades de olor (UO) se realizó con un olfatómetro dinámico Scentroid SM100, utilizando como entrada el aire de la cámara de flujo cargado con compuestos odoríferos, permitiendo así la determinación de la concentración de olor mediante métodos de olfatometría sensorial estandarizados.



Figura 3.25. Equipos utilizados para muestreo de emisiones. Equipo multiRAE (a), Bombas para suministro de aire (b), Flux chamber (Scentroid) (c), sonda de temperatura para compostaje (d), Montaje de equipo para muestreo de gases (e). Fuente: Elaboración propia

Determinación de macroelementos y metales pesados

El análisis de elementos minerales presentes en el compost, incluyendo macroelementos como el fósforo (P) y el potasio (K), así como metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg y Zn), fue externalizado a un laboratorio acreditado, conforme a los procedimientos definidos para garantizar la calidad analítica y la trazabilidad de los resultados.

La cuantificación se realizó mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), técnica reconocida por su alta sensibilidad y precisión en el análisis elemental. Las muestras fueron sometidas previamente a digestión ácida siguiendo protocolos normalizados, para asegurar la total solubilización de los elementos presentes.

Este análisis resulta esencial para determinar la calidad agronómica y ambiental del compost producido, en cumplimiento con los límites establecidos por la normativa europea y autonómica sobre uso de enmiendas orgánicas en suelos agrícolas. La presencia controlada de nutrientes esenciales (P y K) confirma su potencial

fertilizante, mientras que la baja concentración de metales pesados garantiza la inocuidad del producto final para su aplicación en agricultura urbana o periurbana.

3.5.7. Huella carbono

El análisis ambiental se centró en la categoría de impacto Cambio climático, expresada como Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP100) y medida en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq). Para su cálculo se adoptó la metodología de huella de carbono, definida por la ISO 14067:2018 como la cuantificación y comunicación de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero asociadas a un sistema, en este caso el proceso de compostaje de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) dentro del modelo de gestión de residuos. La elección de esta categoría se fundamenta en que el calentamiento global es uno de los impactos ambientales más significativos en el tratamiento de biorresiduos (Colón *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2020; Serafini *et al.*, 2023), y en la alineación con las directrices metodológicas del IPCC para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013; 2019).

El estudio evaluó y comparó dos modelos de gestión: el sistema centralizado (SCC) y el sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC), cuantificando las emisiones directas (alcance 1), las emisiones indirectas por consumo energético (alcance 2) y los impactos evitados derivados de la sustitución de fertilizantes minerales. La metodología adoptó los factores de caracterización del IPCC (2019) para convertir los flujos de CO₂, CH₄ y N₂O en CO₂ equivalente, y se basó en normas reconocidas internacionalmente (ISO 14040, ISO 14067) y en las guías metodológicas del GHG Protocol para la clasificación y reporte de emisiones.

El cálculo se realizó con la herramienta CarbonFootprint_Calculator_MSW, desarrollada por el Centro Tecnológico BETA de la Universidad de Vic – Universidad Central de Cataluña, diseñada para estimar la huella de carbono en la gestión municipal de residuos sólidos urbanos (RSU). Esta herramienta contempla tanto la fracción no separada en origen como la recogida selectiva de fracciones valorizables, integrando factores de emisión específicos para cada tratamiento (compostaje, TMB, vertedero, incineración) y considerando emisiones directas, emisiones indirectas e impactos evitados por valorización material o energética.

La metodología se estructuró siguiendo las fases establecidas por la norma ISO 14040:2006 para estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de procesos:

- a) Definición del objetivo y alcance: determinación de objetivos, contexto de aplicación, límites del sistema y nivel de detalle requerido.
- b) Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV): recopilación de datos primarios y secundarios sobre insumos (materia orgánica, energía, agua) y salidas (emisiones gaseosas, rechazos, compost) asociadas al compostaje y tratamientos complementarios.
- c) Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV): conversión de los datos del inventario en indicadores de impacto climático mediante factores de caracterización (GWP100) del IPCC.
- d) Interpretación de los resultados: análisis crítico para identificar puntos críticos (*hotspots*) y formular recomendaciones de mejora.

Finalmente, la valorización de la materia orgánica como enmienda para suelos representa un beneficio significativo, al sustituir fertilizantes químicos por compost, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático.

Además del desempeño técnico y ambiental, el análisis económico del sistema de compostaje comunitario descentralizado resulta esencial para evaluar su viabilidad y escalabilidad. Por ello, se identificaron y analizaron indicadores económicos clave que permitieran comparar los costos asociados al modelo anterior de gestión centralizada con los del sistema actualmente implementado. Este análisis incluye aspectos como los costos de recogida, transporte, tratamiento y disposición final, así como los potenciales ahorros generados por la valorización in situ de la fracción orgánica. A continuación, se describen las metodologías utilizadas para la estimación y comparación de estos indicadores económicos.

3.6. INDICADORES ECONÓMICOS

La evaluación económica de los escenarios se realizó mediante el análisis del OPEX y CAPEX y de indicadores como: Valor actual neto, tasa interna de retorno y periodo de retorno de inversión.

Costes de inversión (CAPEX)

Los costes de inversión (CAPEX) del sistema se estructuraron en tres componentes principales: las infraestructuras del área de compostaje y posprocesamiento, la adquisición de maquinaria necesaria para la operación y los materiales complementarios asociados a la puesta en marcha del sistema. La estimación del CAPEX se basó en el inventario detallado de las obras civiles e infraestructura instalada y en los equipos operativos requeridos, los cuales se describirán en detalle en el Capítulo 4 sección I Resultados técnicos-operativos. Para cada elemento se recopilaban precios unitarios actualizados procedentes de proveedores locales y bases públicas de contratación, garantizando valores representativos del contexto real. Es importante señalar que el CAPEX varió entre escenarios debido a las diferencias en el equipamiento necesario para la operación: mientras algunos escenarios requieren mecanización parcial o total para alcanzar los niveles de eficiencia previstos, otros escenarios se apoyan en una mayor proporción de trabajo manual, reduciendo la necesidad de inversión inicial en maquinaria. Esta aproximación permitió obtener estimaciones de CAPEX diferenciadas y coherentes con las particularidades operativas de cada escenario analizado.

Costes Operativos (OPEX)

Los costes operativos (OPEX) en los distintos escenarios están determinados, principalmente, por tres componentes: los salarios del personal, el mantenimiento de los equipos y el consumo de combustible. Otros gastos operativos, como el control de plagas, el consumo eléctrico y los análisis del compost, se mantienen constantes entre escenarios.

Dado el carácter innovador del sistema evaluado, los datos relacionados con los tiempos de operación fueron obtenidos directamente a partir de mediciones en terreno. El esfuerzo físico requerido fue estimado mediante el cálculo de las horas-hombre necesarias para cada actividad, considerando el tiempo de ejecución, la frecuencia de repetición y el número de personas involucradas en cada tarea (Ecuación 13). Este esfuerzo resulta especialmente relevante en actividades manuales como la aireación de la materia orgánica, el traslado del compost maduro y el manejo de materiales estructurantes, las cuales imponen una carga física considerable sobre el personal operativo. Esta aproximación permitió cuantificar el impacto de dichas variables sobre

los costes de operación y fue aplicada de manera sistemática a todos los escenarios analizados.

$$\text{Manipulación de cargas} = \text{Tiempo} \left(\frac{\text{horas}}{\text{actividad}} \right) \times \text{No. de personas} \times \text{frecuencia} \quad \text{Ecuación 13}$$

El tiempo requerido constituye un factor crítico en la evaluación de cada escenario, ya que se relaciona directamente con el número total de horas-persona dedicadas a la operación de los compostadores. Esta variable depende en gran medida del tipo de manejo implementado en campo, que puede ser manual —como en los escenarios 1A, 1B, 2A y 2B— o mecanizado —como en los escenarios 3A y 3B—. Posteriormente, el total de horas fue multiplicado por el valor del salario por hora, lo que permitió calcular el coste laboral asociado a cada uno de los escenarios.

$$\text{Costo por escenario} = \text{Valor del salario por hora (€)} \times \text{Tiempo} \quad \text{Ecuación 14}$$

La evaluación económica se desarrolló a lo largo de un periodo de tres años, siguiendo una secuencia en la implementación de los distintos escenarios: inicialmente, se aplicaron los parámetros definidos para los escenarios 1A y 1B, caracterizados por una operación manual con dos transferencias.

Durante este periodo de análisis, fue posible identificar las actividades que demandaron un mayor esfuerzo físico, así como el tiempo requerido para su ejecución y los costes asociados. Las diferencias en los costes operativos entre los seis escenarios analizados se explican principalmente por la variación en los salarios del personal y el consumo de combustible, aspectos que se detallan en el capítulo 4, sección I Resultados técnicos.

Cálculo del valor hora coste empresa

El valor de la hora ordinaria (coste empresa) se obtuvo dividiendo el coste anual total de un trabajador para la empresa entre la jornada laboral anual. Para este cálculo se consideró el salario anual bruto más las contribuciones patronales a la seguridad social, lo que representa un coste total de 27.613,80 € por trabajador y año. Este valor se dividió entre las 1.800 horas laborales anuales establecidas, resultando en un coste de 15,34 €/hora. Esta estimación refleja el valor real que supone para la empresa cada hora de trabajo de un empleado en condiciones estándar de contratación.

Valor Actual Neto (VAN): Este método permite evaluar la viabilidad económica del proyecto de compostaje descentralizado. Se calcula sumando la inversión inicial y el valor presente de todos los flujos de efectivo futuros, descontados a una tasa de interés especificada.

En este estudio, el flujo de caja considerado es el ahorro anual comparado con el modelo anterior de gestión de la fracción orgánica, lo que implica los costos evitados en comparación con el tratamiento centralizado frente al tratamiento descentralizado mediante compostaje comunitario. Se incluyen los ahorros en reducción de costos operativos, optimización de procesos y retorno del canon.

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CI - CO)t(1 + i_0)^{-t} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde: *CI* representa los ingresos generados, *CO* los costos operativos, *t* es el tiempo, *i₀* es la tasa de descuento y *n* es la duración del proyecto (15 años). Para este análisis, se calcularon los valores de VAN con tasas de descuento del 5 % y 7 %, permitiendo evaluar la sensibilidad del proyecto ante variaciones en la tasa de descuento.

Tasa Interna de Retorno (TIR): Representa la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero. La TIR permite evaluar la rentabilidad financiera del proyecto comparando su valor con la tasa mínima aceptable de retorno o tasa de descuento empleada en el análisis. Si la TIR supera dicho umbral, el proyecto se considera rentable. Su cálculo se expresa mediante la ecuación 16

$$(CI - CO)t + (1 + IRR)^{-t} = 0 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde: *CI* representa los ingresos generados, *CO* son los costos operativos, *t* es el tiempo, *IRR* es la tasa Interna de Retorno.

En términos financieros, una inversión se considera viable cuando la Tasa Interna de Retorno (TIR) es superior a la tasa de descuento utilizada en el análisis, ya que ello indica que la rentabilidad del proyecto supera la rentabilidad mínima aceptable. No obstante, la TIR debe interpretarse juntamente con el Valor Actual Neto (VAN) y otros indicadores financieros.

Periodo de Retorno de la Inversión (PRI): Representa el tiempo necesario para recuperar el capital invertido. Se calcula dividiendo la inversión inicial entre el flujo de caja neto anual:

$$IPP = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujo neto anual}} \quad \text{Ecuación 17}$$

3.7. ASPECTOS E INDICADORES SOCIALES

El componente social del sistema de compostaje comunitario descentralizado (SCD) se abordó desde dos dimensiones complementarias: (i) la ejecución de actividades de sensibilización, información y acompañamiento comunitario previas a su implementación, y (ii) la evaluación de indicadores sociales vinculados al grado de aceptación, uso y percepción ciudadana del nuevo modelo de gestión de residuos orgánicos.

(i) Actividades previas de sensibilización y divulgación

Antes de la puesta en marcha del SCD, se implementó un programa integral de sensibilización orientado a preparar e involucrar activamente a la comunidad de Les Masies de Roda (LMR). Este incluyó encuentros presenciales en diferentes barrios, en los que se capacitó a la ciudadanía sobre el funcionamiento del sistema de recolección puerta a puerta y el uso correcto de los compostadores comunitarios.

Para facilitar la adopción del modelo, se distribuyeron materiales de apoyo —bolsas compostables y contenedores domésticos— y se difundieron horarios y normas de uso a través de carteles, folletos impresos, vallas informativas en puntos estratégicos y publicaciones digitales en la página web municipal.

Complementariamente, se estableció un sistema comunitario para la gestión de residuos verdes, consistente en un punto de acopio donde los vecinos podían depositar restos de poda o solicitar su recogida (en volúmenes inferiores a 1 m³). Este material era triturado e incorporado como agente estructurante en el proceso de compostaje, fomentando la circularidad y reduciendo la dependencia de insumos externos.

Como parte de la valorización del compost generado, se realizó su entrega gratuita a los participantes, junto con actividades educativas en centros escolares —visitas

guiadas a las áreas de compostaje y postprocesamiento—, reforzando la conciencia ambiental desde edades tempranas.

(ii) Campañas de difusión y actividades comunitarias previo a la implementación

Previo a la puesta en marcha del sistema de compostaje comunitario descentralizado, se diseñó e implementó un programa de sensibilización basado en metodologías participativas y enfoques de comunicación comunitaria, con el objetivo de informar, educar y fomentar la apropiación ciudadana del nuevo modelo de gestión de residuos. Se elaboraron materiales gráficos y audiovisuales (folletos, trípticos, carteles, presentaciones multimedia) y se organizaron sesiones informativas, encuentros comunitarios y jornadas de entrega de kits de separación. En total, participaron 1805 personas de distintos perfiles sociodemográficos, incluyendo hogares, personal técnico municipal, representantes de asociaciones locales y estudiantes de centros educativos. Estas acciones respondieron a marcos teóricos que destacan la importancia de la participación ciudadana en el éxito de políticas de gestión de residuos (cf. Wilson *et al.*, 2012). Además, contribuyeron al fortalecimiento de capacidades locales (ODS 11), promoción de consumo responsable (ODS 12) y acción climática mediante la reducción de residuos orgánicos (ODS 13), consolidando una base social favorable para la sostenibilidad del proyecto.

Para la implementación del sistema de compostaje descentralizado (SCD) en Les Masies de Roda, se llevaron a cabo diversas acciones de divulgación empleando materiales promocionales y explicativos orientados a informar a la ciudadanía sobre el funcionamiento del nuevo modelo de recogida y gestión de residuos, como se muestra a continuación:

- 1) **Diseño e impresión de material informativo:** Se elaboró un tríptico informativo diseñado para comunicar de forma gráfica y accesible los objetivos, funcionamiento y beneficios del nuevo sistema de compostaje comunitario. Su distribución se realizó mediante un programa de reparto domiciliario impulsado por el Centro Tecnológico BETA, que incluyó explicaciones presenciales a los vecinos, fomentando así un diálogo directo y el fortalecimiento de la confianza entre la comunidad y las instituciones

locales (Figura 3.26). Esta estrategia se alinea con enfoques de comunicación de proximidad recomendados en la literatura para procesos de transición hacia modelos sostenibles de gestión de residuos (cf. Mazzanti y Zoboli, 2008).



Figura 3.26. Folleto informativo sobre el nuevo SCD. El documento presenta el calendario de recogida selectiva por fracciones, el funcionamiento operativo del PaP, y la introducción de puntos de compostaje comunitario como estrategia para optimizar la gestión de la fracción orgánica y reducir residuos destinados a vertedero. *Fuente: Decost (2021)*

- 2) **Sesiones informativas:** Se organizaron sesiones informativas abiertas a la ciudadanía, con inscripción habilitada a través de la página web del Ayuntamiento y por vía telefónica, garantizando así la accesibilidad a todos los sectores poblacionales. Durante estos encuentros, representantes del Ayuntamiento de LMR, la entidad RRO y el Centro Tecnológico BETA expusieron en detalle el modelo de recogida puerta a puerta y uso de los compostadores, utilizando material audiovisual como apoyo. Posteriormente, se desarrolló un espacio de diálogo abierto que permitió a los asistentes plantear preguntas, expresar inquietudes y compartir sugerencias. Este formato participativo favorece la construcción de confianza y fortalece la apropiación social del proyecto, en consonancia con los marcos conceptuales de gobernanza colaborativa y participación deliberativa en políticas ambientales (cf. Bulkeley y Newell, 2015).
- 3) **Entrega de material:** Durante estos encuentros, se entregaron materiales de apoyo —incluyendo bolsas compostables y cubos domésticos— para facilitar la separación en origen de la fracción orgánica. Asimismo, se

proporcionó información detallada sobre los horarios de recogida de las distintas fracciones de residuos, contribuyendo a consolidar un enfoque integral de gestión de desechos en el municipio. Estas actividades, enmarcadas en prácticas de educación ambiental comunitaria, fomentan la participación de la población y fortalecen la adopción temprana de hábitos sostenibles, en consonancia con recomendaciones académicas sobre programas de transición hacia modelos circulares de gestión de residuos (cf. Miliute-Plepiene *et al.*, 2016).

- 4) **Actividades lúdicas y demostrativas:** Durante la celebración de la fiesta mayor de Les Masies de Roda, se habilitó un espacio de sensibilización ambiental mediante actividades lúdicas y educativas, dirigidas a públicos de todas las edades (figura 3.27). Estas actividades incluyeron juegos de clasificación de fracciones de residuos, triviales de reciclaje, siembra de semillas en compost y decoración artística de compostadores, con el propósito de promover prácticas de separación en origen y reforzar el aprendizaje colectivo sobre compostaje comunitario. Además, se instaló un compostador demostrativo, donde se explicaba el correcto depósito de materia orgánica. Este tipo de intervenciones, integradas en eventos locales, favorecen la socialización del conocimiento técnico y estimulan la participación ciudadana, en línea con enfoques de educación ambiental crítica y transformadora (cf. Monroe *et al.*, 2019).

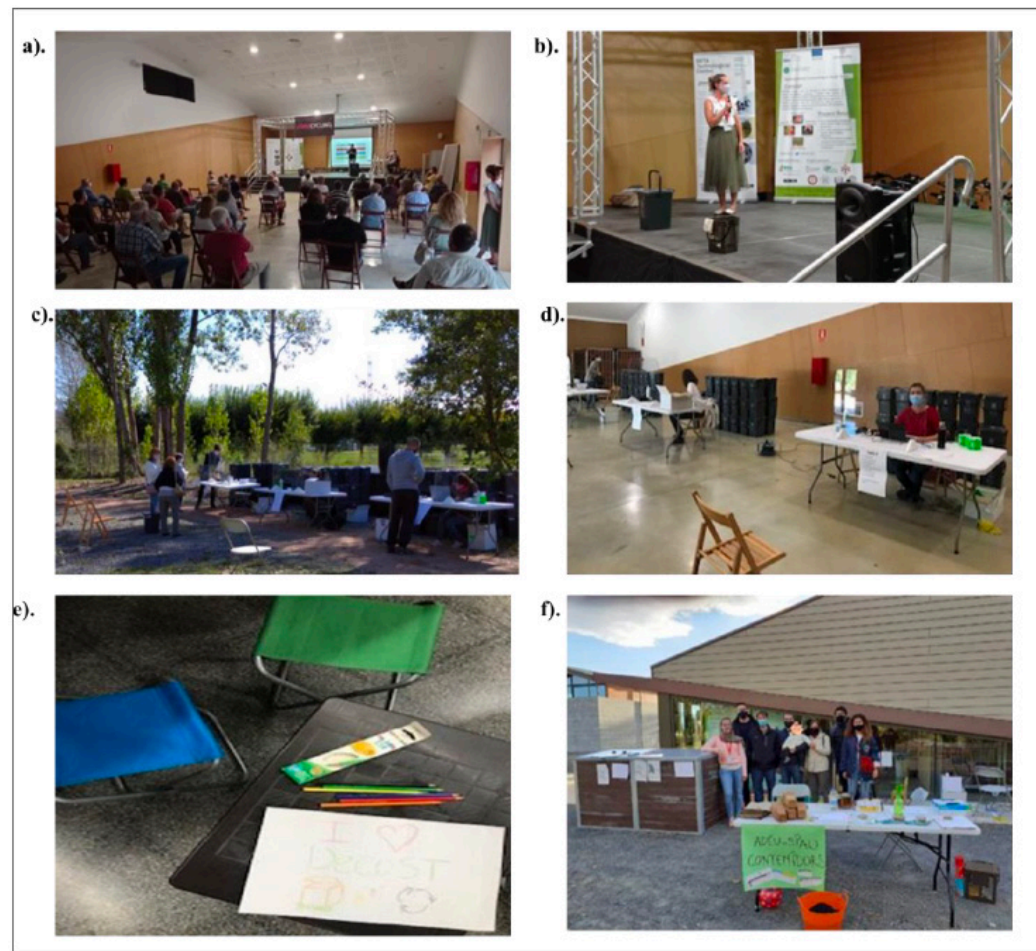


Figura 3.27. Registro fotográfico de las actividades de sensibilización, entrega de materiales y compostaje comunitario en LMR. a) Sesión informativa celebrada en la sala polivalente del Ayuntamiento de Les Masies de Roda, con participación de representantes municipales, la entidad RRO y el Centro Tecnológico BETA, donde se expuso el modelo de recogida puerta a puerta y el uso de compostadores, favoreciendo el diálogo abierto con la ciudadanía. b) Presentación técnica a cargo del equipo de proyecto, apoyada con material audiovisual, para explicar el funcionamiento del sistema y resolver dudas en un formato participativo. c) Entrega de material de apoyo en un espacio exterior, incluyendo bolsas compostables y cubos domésticos para la fracción orgánica, acompañada de información sobre horarios y procedimiento de recogida. d) Puesto de entrega de materiales en interior, organizado para garantizar la accesibilidad y dotar a la población de los recursos necesarios para la separación en origen. e) Actividad lúdica durante la fiesta mayor, con espacio infantil de sensibilización ambiental, donde se realizaron dinámicas creativas relacionadas con el compostaje comunitario. f) Punto demostrativo instalado en la vía pública con compostadores comunitarios, donde se ofrecieron explicaciones sobre el correcto depósito de materia orgánica y se realizaron talleres prácticos para reforzar el aprendizaje colectivo. *Fuente: Elaboración propia*

(iii) Indicadores sociales: diseño y aplicación de encuestas

Una vez implementado el sistema, se diseñó y aplicó una encuesta estructurada para evaluar la percepción, la experiencia de uso y el grado de aceptación del modelo de gestión descentralizada de residuos orgánicos. El cuestionario se organizó en tres bloques temáticos:

- Conocimiento del sistema: evaluó el nivel de familiaridad de la población con el sistema de recogida puerta a puerta y con el funcionamiento de los compostadores comunitarios.
- Satisfacción y valoración ambiental: midió el grado de satisfacción, la facilidad de uso percibida y la valoración de los beneficios ambientales del modelo.
- Frecuencia y hábitos de uso: analizó la regularidad con la que los usuarios utilizaban los compostadores y las posibles barreras para su uso continuado.

Las respuestas obtenidas se emplearon para identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora en la estrategia de comunicación y en las futuras campañas de sensibilización. El análisis detallado de estos indicadores se presenta en el capítulo de Resultados, sección de evaluación social.

3.7.1. Marco metodológico de evaluación social

La selección de indicadores y la interpretación de resultados se basaron en marcos metodológicos de referencia reconocidos internacionalmente, adaptados al contexto del sistema de compostaje comunitario descentralizado de LMR. En particular, se aplicaron principios de la Evaluación de Impacto Social (SIA) (Vanclay, 2003) para identificar y medir cambios sociales derivados de la implementación del sistema, y elementos del Retorno Social de la Inversión (SROI) (The SROI Network, 2012) para relacionar los beneficios sociales con los recursos invertidos.

Este enfoque híbrido permitió integrar datos cuantitativos —procedentes de encuestas y registros de participación— con información cualitativa obtenida a partir de interacciones comunitarias, garantizando una evaluación integral del valor social creado por el proyecto. Asimismo, permitió vincular los resultados con marcos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), reforzando su

relevancia para la planificación de políticas públicas y la replicabilidad del modelo en otros contextos.

Consideraciones éticas

Este proyecto no ha sido sometido a la evaluación de un comité de ética, ya que no involucra experimentación con seres humanos ni animales, ni el uso de datos personales o información sensible. Las encuestas realizadas se llevaron a cabo de forma anónima y voluntaria, garantizando la confidencialidad y el consentimiento informado de los participantes. Por tanto, no se ha considerado necesaria una aprobación ética formal.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE COMUNITARIO DESCENTRALIZADO (SCD): EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL



CAPÍTULO IV

RESULTADOS DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE COMUNITARIO DESCENTRALIZADO (SCD): EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten constatar el cumplimiento del objetivo general planteado. El compostaje comunitario descentralizado se integró de manera efectiva en el sistema municipal de gestión de residuos de Les Masies de Roda, articulándose con la recogida puerta a puerta y garantizando la separación en origen de la fracción orgánica mediante campañas de sensibilización y acompañamiento ciudadano. La totalidad de la materia orgánica se gestionó a través de este sistema, consolidando el compostaje como única vía de tratamiento local. Asimismo, la valorización del compost producido se materializó en diversas iniciativas de los vecinos en sus huertos en casa, huertos escolares y espacios comunitarios, evidenciando la circularidad del modelo. De este modo, la experiencia demuestra que el compostaje comunitario descentralizado no solo es técnico, económica y ambientalmente viable, sino que también constituye una estrategia socialmente inclusiva y alineada con las metas de sostenibilidad municipal.

Este capítulo presenta los principales resultados obtenidos durante la implementación y evaluación del SCD con gestión profesionalizada en el municipio de LMR. A partir de una metodología sólida y de una operación sistematizada en campo, se analizó el desempeño del sistema desde una perspectiva integral, estructurada en cuatro ejes: técnico, ambiental, económico y social.

El proceso de implementación se desarrolló a través de diferentes escenarios operativos (1A, 1B, 2A, 2B, 3A y 3B), que permitieron analizar la evolución del sistema, sus niveles de optimización y su adaptabilidad en función del contexto territorial y operativo. Esta evolución se acompañó de un seguimiento continuo que permitió recopilar datos empíricos de carácter técnico, económico y social, esenciales para fundamentar el análisis comparativo entre alternativas de gestión.

Los resultados se presentan en tres bloques:

- 1) Resultados técnicos: Se analiza el desempeño operativo por escenario, evaluando indicadores como tiempo anual de trabajo por actividad (transvases, aireación, tamizaje, desplazamientos), distribución del esfuerzo físico, reducción de riesgos laborales y eficiencia en el uso de recursos. También se incluyen ratios técnicos clave como la relación estructurante/FORM y la capacidad real de tratamiento por sistema, así como los cambios derivados de la mecanización.
- 2) Resultados ambientales: Se desarrolla un análisis de huella de carbono, comparando dos modelos para el tratamiento de la fracción orgánica: SCC vs SCD implementado en LMR. Se evalúan los impactos ambientales asociados al transporte, consumo energético, emisiones directas e indirectas. Este análisis permite establecer la contribución del sistema descentralizado a la mitigación del cambio climático y su alineación con estrategias de economía circular.
- 3) Resultados económicos y sociales: Se examinan indicadores económicos del SCD en comparación con el sistema previo de tratamiento centralizado, incorporando variables como, coste horario por actividad, consumo energético anual, horas-persona necesarias y otros costes operativos directos. El análisis se realiza considerando instrumentos financieros existentes en el marco de las políticas públicas municipales, y se evalúa su viabilidad como modelo escalable en contextos similares mediante el uso de indicadores económicos clásicos como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Retorno de la Inversión (PRI).
- 4) Resultados sociales: Se valoran aspectos como la participación por barrio, y la viabilidad social del sistema en función de su adaptación a las dinámicas locales y su apropiación por parte de la comunidad.

Este enfoque transversal permite identificar el grado de optimización alcanzado por el modelo implementado, así como sus ventajas comparativas frente al sistema convencional, aportando evidencia científica para la toma de decisiones en políticas públicas de gestión de residuos, planificación municipal y escalamiento de modelos sostenibles de compostaje comunitario.

CAPÍTULO IV. SECCIÓN 1

EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE: DESEMPEÑO OPERATIVO, EFICIENCIA Y CALIDAD DEL PRODUCTO



CAPÍTULO IV. SECCIÓN 1

EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE: DESEMPEÑO OPERATIVO, EFICIENCIA Y CALIDAD DEL PRODUCTO

Este capítulo presenta los resultados técnicos obtenidos durante la implementación y evaluación de diferentes escenarios operativos en un sistema de compostaje comunitario descentralizado (SCD). A partir de la experiencia acumulada durante tres años, se analizan aspectos clave como el tipo de operación (manual o mecanizada), la frecuencia de mantenimiento, el número de transvases y la calidad del compost final. Los resultados permiten identificar el escenario más eficiente, sostenible y replicable a nivel municipal, con el fin de aportar criterios técnicos robustos para el diseño de sistemas de gestión de residuos orgánicos mediante compostaje descentralizado.

En el presente análisis técnico, se consideran únicamente los componentes operativos directamente relacionados con el uso de maquinaria, dado que estos tienen una influencia significativa en los costos variables del sistema de compostaje. La inclusión de maquinaria no solo modifica la distribución del tiempo operativo y la intensidad del trabajo físico, sino que también representa un componente clave para la sostenibilidad económica del sistema, al reducir la carga laboral y optimizar la frecuencia de atención requerida.

Los objetivos específicos de este capítulo son:

- Describir y comparar los diferentes escenarios operativos implementados en campo, evaluando el impacto de variables clave como el tipo de mezcla (manual vs mecánica), la frecuencia de operación y el número de transvases requeridos.
- Analizar los flujos de materiales, incluyendo la cantidad de materia orgánica aportada, el compost producido, la fracción de estructurante recirculado y la proporción de impropios presentes.
- Evaluar la eficiencia técnica y económica de cada configuración operativa, incluyendo el tiempo de trabajo requerido por actividad, asociados al personal y la viabilidad a largo plazo del sistema.

- Caracterizar la calidad fisicoquímica del compost obtenido, comparando los valores alcanzados con las normativas vigentes y los estándares internacionales, así como su adecuación para su uso agrícola.
- Identificar el escenario más adecuado para su implementación a escala municipal, considerando no solo los resultados técnicos, sino también su replicabilidad, escalabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

Este análisis integral permite consolidar criterios técnicos sólidos que sustenten decisiones de política pública en torno a la gestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales mediante compostaje descentralizado.

4.1. RELACIÓN CON LOS MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente, los equipos fueron utilizados en su estado original, sin modificaciones. Sin embargo, conforme avanzaba la implementación de cada escenario operativo, se realizaron adaptaciones progresivas en la infraestructura y en los equipos, incorporando mejoras y herramientas adicionales para optimizar el proceso. Estas innovaciones surgieron de manera empírica a partir de la experiencia acumulada por el personal técnico responsable de la operación diaria de los compostadores, así como del equipo del Ayuntamiento de LMR, quienes ajustaron el sistema en función de las necesidades operativas observadas en terreno. Para una mejor comprensión del proceso, en la Tabla 4.1 se detallan los equipos adicionales incorporados durante la operación de cada escenario. Estos equipos complementan los ya descritos en el capítulo de materiales y métodos, y se especifica en qué escenarios fueron implementados.

Tabla 4.1. Descripción de equipos y su uso en los escenarios

INSTALACIÓN/ EQUIPO/INSUMO	DESCRIPCIÓN	ESCENARIOS					
		1A	1B	2A	2B	3A	3B
Cajón de estructurante	Compartimiento en madera para almacenar el agente estructurante	X	X				
Agente Estructurante	Teniendo en cuenta que al inicio del proceso de compostaje no existe un agente estructurante, es necesario adquirir un agente estructurante para garantizar las condiciones del proceso de compostaje.	X					
Herramientas	Utensilios utilizados para realizar actividades de mantenimiento como: aireador, horquilla, pala, lona.	X	X	X	X		
Bolsa grande con asas	A diferencia de los big bags con asas, estos tienen cintas en la parte inferior, lo que permite que el material a tamizar se descargue en la tolva, que está conectada a la cinta transportadora.		X	X	X	X	X
Remolque de uso manual	Se puede instalar y desinstalar fácilmente en una furgoneta para facilitar su transporte, contiene un sistema de poleas que permite el arrastre de material pesado al enlazarse a un mosquetón atado a roll container	X	X				
Remolque Mecánico	Se puede instalar y desinstalar fácilmente en una furgoneta para facilitar su transporte, también contiene una grúa pluma de menor potencia que permite la carga y descarga del material, que trabaja a menor altura. Todas las maniobras se realizan a control remoto			X	X		
Camión- Grúa- Mezcladora	El camión motor diésel turboalimentado de 2.5 a 3.0 litros, con una potencia estimada entre 110 y 150 caballos de fuerza (CV), cuenta con una grúa pluma instalada, que permite la elevación y descarga de materiales, así como el uso de la mezcladora. El mezclador consta de un soporte vertical en forma de caracol que gira para airear la materia orgánica. Es accionado mecánicamente por diésel a través del motor del camión, que proporciona la potencia para su funcionamiento. Las maniobras se realizan a control remoto.					X	X
Estructura circular de hierro	Tambor de hierro ubicado dentro del compostador						X
Trituradora	Máquina portátil que permite triturar, podar y ramas que posteriormente se utilizan como material estructurante		X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Descripción de los escenarios operativos

Durante los tres años de estudio se evaluaron seis escenarios operacionales (3 tipos de operación y 2 frecuencias) en el SCD, definidos a partir de la combinación de tres características principales que condicionan el rendimiento técnico y económico del proceso. Este diseño experimental no se construyó únicamente desde la perspectiva académica, sino que fue fruto de una estrecha cooperación entre los operarios del sistema, el Ayuntamiento y el Centro de Investigación Beta. La experiencia práctica de los operarios aportando ideas surgidas de la operación diaria, sumada a las propuestas técnicas y conceptuales del centro, permitió generar un proceso de retroalimentación continua. Esta dinámica colaborativa no solo enriqueció la definición de los escenarios, sino que también facilitó su implementación y validación en condiciones reales, consolidando un modelo de gobernanza compartida y de innovación aplicada en compostaje comunitario descentralizado.

Primera característica: Tipo de operación evaluada en tres niveles:

- Manual (1): Sin el uso de maquinaria motorizada.
- Semimanual (2): Combinación de herramientas manuales con maquinaria ligera.
- Mecanizado (3): Uso predominante de maquinaria para la realización de tareas operativas.

Segunda característica: Frecuencia de operación:

- Tres veces por semana (A): Mayor frecuencia con menor intensidad en la gestión operativa (mezcla). Atención de la totalidad de los compostadores tres veces por semana.
- Cuatro días por semana (B): En este escenario se redujo la frecuencia de operación por compostador, pero se incrementó la intensidad de las tareas (mezcla). La jornada de trabajo se organizó en cuatro días semanales, en los cuales se atendían dos secciones distintas por día. Este esquema permitió optimizar el tiempo total invertido, ya que, aunque la frecuencia era menor, cada visita concentraba mayor volumen de trabajo, resultando en un menor número de horas acumuladas respecto a otros escenarios.

La frecuencia de aireación demostró ser un factor determinante en la operación de los compostadores comunitarios. La ejecución de la mezcla tres veces por semana en un total de 28 compostadores (28 de 58 que requieren aireación permanente) evidenció limitaciones operativas, principalmente asociadas a la disminución en la calidad de la aireación.

Lo anterior se explica por las características funcionales de cada etapa del proceso. En primer lugar, los módulos de aportación demandan mezcla constante, ya que en ellos se recibe la fracción orgánica fresca. La aireación en esta etapa es fundamental para suministrar oxígeno, evitar la compactación del material y prevenir condiciones anaerobias que podrían generar lixiviados y procesos de putrefacción.

En segundo lugar, los módulos de maduración también requirieron aireación durante las dos semanas posteriores al transvase, debido a que el material se mantiene en fase termófila activa. En esta fase aún se generan temperaturas elevadas y una intensa actividad microbiana, por lo que es esencial mantener niveles adecuados de oxigenación que aseguren la continuidad del proceso aeróbico y la higienización del material.

Adicionalmente, la necesidad de aireación diferenciada responde a criterios de bioestabilidad y control de calidad: garantizar un proceso homogéneo de degradación, evitar la generación de olores y lixiviados, y asegurar que el compost resultante cumpla con los parámetros de madurez y estabilidad exigidos para su aplicación en suelos. Por estas razones, los 28 compostadores que concentran el material en fases más activas del proceso (aportación y primeras semanas de maduración) fueron priorizados en la programación de aireación.

Esta situación se atribuye al esfuerzo físico considerable que implica esta tarea, así como a la extensión de las jornadas laborales requeridas para cubrir dicha frecuencia. En contraste, la operación con una frecuencia de cuatro veces por semana (dos veces por cada compostador) permitió mejorar la eficiencia operativa. Esta modalidad posibilitó una mejor distribución del trabajo, asignando 18 compostadores a una jornada y 10 a otra, lo que redujo significativamente la carga física, acortó las jornadas y facilitó el manejo de la materia orgánica fresca, contribuyendo así a la optimización del proceso.

La definición de las frecuencias de operación se fundamentó en el análisis de la cantidad de materia orgánica aportada por cada vecindario. La estabilidad de estos

aportes a lo largo del año sugiere que las fluctuaciones estacionales (como los descensos en generación de residuos durante periodos vacacionales o cambios en patrones de consumo) no tienen un impacto operativo significativo en el contexto evaluado. Esta estabilidad permitió establecer una planificación operativa continua y eficiente.

En cuanto a los patrones de generación por vecindario, se observó una clasificación constante en los niveles de aporte, lo cual indica que los factores estructurales — como la densidad poblacional y las condiciones socioeconómicas— tienen mayor influencia en la generación de residuos orgánicos que las variaciones estacionales. Esta previsibilidad en los volúmenes generados facilitó la asignación diferenciada de frecuencias de operación, adaptadas a las necesidades específicas de cada zona. Un análisis detallado de estos aspectos se presenta en esta sección. La Tabla 4.2 resume la variabilidad en los aportes de materia orgánica por vecindario y su relación con los criterios de frecuencia y mezcla implementados.

Tabla 4.2. Variabilidad de materia orgánica manejada por frecuencia

Escenario según frecuencia	Frecuencia de operación	Barrio	Cantidad de materia orgánica fresca atendida por frecuencia (t/día)	Nº de Compostadores Aireados
A: 3 veces/semana cada compostador	Lunes	Barrios: 1 al 5	0.85	28
	Miércoles	Barrios: 1 al 5	0.6	28
	Viernes	Barrios: 1 al 5	0.5	28
B: 2 veces/semana cada compostador	Lunes	Barrios: 2 al 5	0.77	18
	Martes	Barrio 1	0.28	10
	Jueves	Barrios: 2 al 5	0.25	18
	Viernes	Barrio 1	0.65	10

*Barrio 1: Cases Noves; Barrio 2: l'Esquerda; Barrio 3: Fontanelles; Barrio 4: Vicenç; Barrio 5: Punto de recogida. Fuente Elaboración propia

Esta metodología permitió abordar las variabilidades y optimizar las estrategias operativas, asegurando un manejo eficiente y adaptado a las características particulares de cada barrio.

Tercera Característica: Número de transvases por ciclo

Los transvases representan una actividad operativa clave en el proceso de compostaje descentralizado, especialmente en sistemas manuales y semi manuales. Esta tarea es crucial para proporcionar oxígeno a la materia orgánica de manera uniforme, favoreciendo el proceso de descomposición aeróbica. Sin embargo, también implica altas demandas de tiempo y esfuerzo físico, ya que requiere mover grandes volúmenes de material entre unidades de compostador. Al mecanizar el sistema, los transvases se vuelven innecesarios debido a la introducción de herramientas, como mezcladores, que permiten proveer oxígeno de forma más eficiente y con una sola operación. Este cambio no solo optimiza la aireación, sino que también reduce significativamente el tiempo de trabajo y el esfuerzo físico del personal operativo, mejorando así la viabilidad técnica del sistema.

La Figura 4.1 muestra los pasos principales del transvase, se llevaron a cabo transvases en cada sitio de compostaje, involucrando (en general) cuatro pasos principales:

El compost listo para el tamizado se retira del módulo correspondiente (generalmente el módulo en la tercera posición) de cada sitio de compostaje utilizando un rollcontainer y una bolsa grande (big bag) para su transporte.

Después de la retirada del compost, se ubica un nuevo contenedor rodante con un big bag vacío dentro del módulo de compostaje para que esté listo para el siguiente transvase.

A continuación, la materia orgánica se transvasa del segundo módulo de compostaje (etapa intermedia de compostaje) al tercero (primer transvase).

El material del primer módulo o módulo de aportación (módulo de compostaje que recibe diariamente la FORM) se transvasa al segundo módulo, dejando el módulo de entrada listo para usar de nuevo. (segundo transvase).

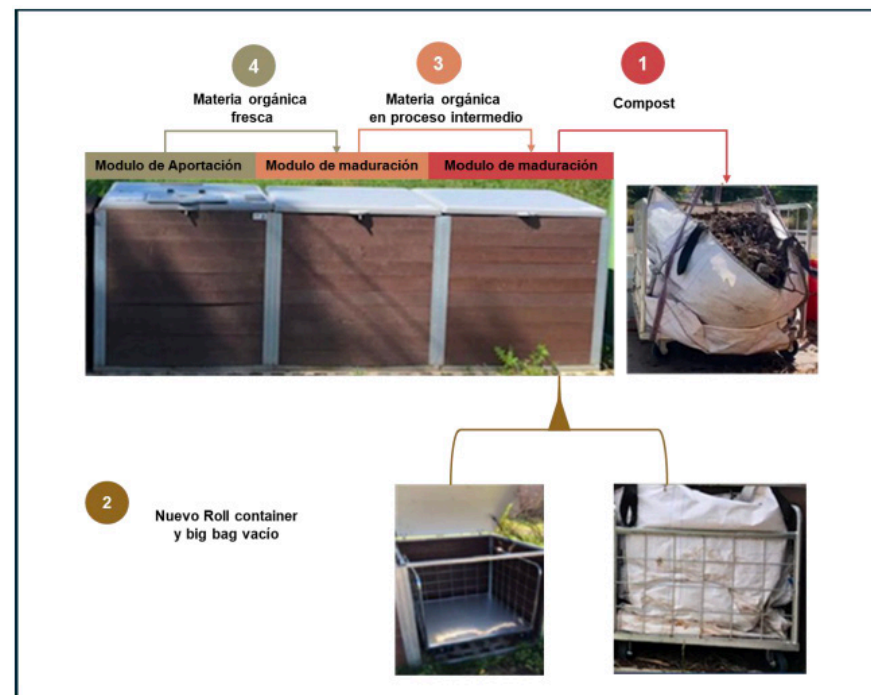


Figura 4.1. Escenarios de pasos de transvase con mezcla manual. Fuente: Elaboración propia

4.1.1.1. Escenario 1A y 1B – Operación 100 % manual con dos transvases

Estos escenarios corresponden a la fase inicial de implementación del sistema de compostaje, caracterizados por una operación 100 % manual. Para su ejecución, se requería la participación de dos personas y la realización de dos transvases por ciclo operativo. Como se observa en la Figura 4.3. La infraestructura asociada a este escenario consistía en un módulo fijo destinado a la aportación de materia orgánica y dos módulos adicionales utilizados para la fase de maduración. A continuación, se describe cada escenario.

Escenario 1 A: La infraestructura en este escenario consistió en categorizar los módulos de compostaje, entre aportación y maduración, siendo el primero el de aportación y el segundo y tercero el de maduración, además de la ubicación de un carro con un big bag en su interior con el fin de ayudar en el desplazamiento de cargas pesadas. La operación en este escenario se realizó manualmente, usando herramientas como el aireador, horca y azada, para suministrar el oxígeno necesario en el proceso, además de realizar dos trasvases por ciclo.

Debido a que la operación en este escenario era 100 % manual, implicaba una mayor dedicación de tiempo, no solo para la aireación sino también para realizar 2 transvases por ciclo y una frecuencia de atención de tres veces por compostador.

A finales del primer año de operación se inició la sustitución del remolque, pasando del primero que era totalmente manual al mecanizado que incluía una pluma en vez del sistema de polea, disminuyendo así el esfuerzo físico que implicaba el cargue de compost que se trasladaba al área de postprocesamiento y el descargue del material estructurante que se almacenaba en el cajón de estructurante.

Escenario 1 B: Las actividades en este escenario son las mismas que en el escenario 1A, la única diferencia es la frecuencia de operación, dos veces por semana cada compostador.

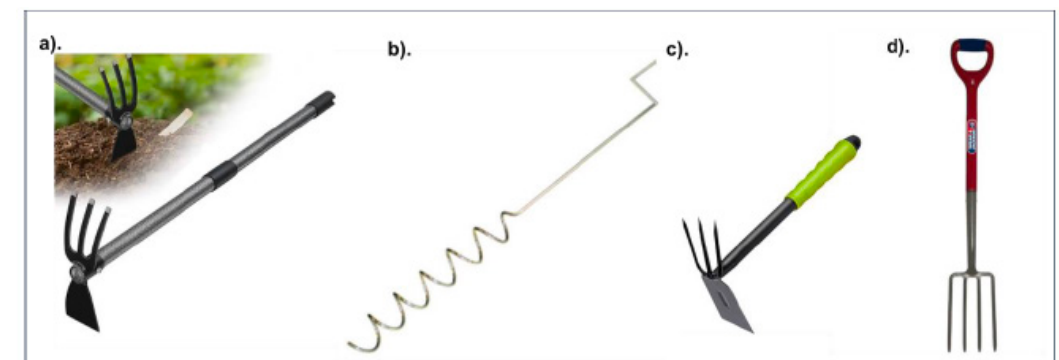


Figura 4.2. Herramienta manual utilizada para la aireación y mezcla de la fracción orgánica en módulos comunitarios a). Azada de doble uso, b). Aireador, c). Azada de doble uso corto, d). Horca. Fuente: Elaboración propia

Aireación manual en los módulos de aportación: La aireación manual es otra de las tareas clave en los sistemas de compostaje descentralizado, y también se encuentra ilustrada en la Figura 4.2. Esta actividad, tiene como finalidad mantener condiciones aeróbicas estables y regular la humedad interna del material. En las imágenes se aprecia cómo dos personas trabajan removiendo el contenido con herramientas manuales, lo que permite redistribuir el estructurante, descompactar zonas y verificar la homogeneidad de la mezcla.

Esta operación también representa un esfuerzo físico relevante, debido al peso del material fresco y a la profundidad que se debe alcanzar para lograr una aireación

eficaz. En las fotografías se observa la liberación de calor y vapor, especialmente tras la mezcla, lo cual confirma que el proceso biológico está activo. Estos signos son característicos del inicio de la descomposición aeróbica y reflejan un adecuado nivel de actividad microbiana.

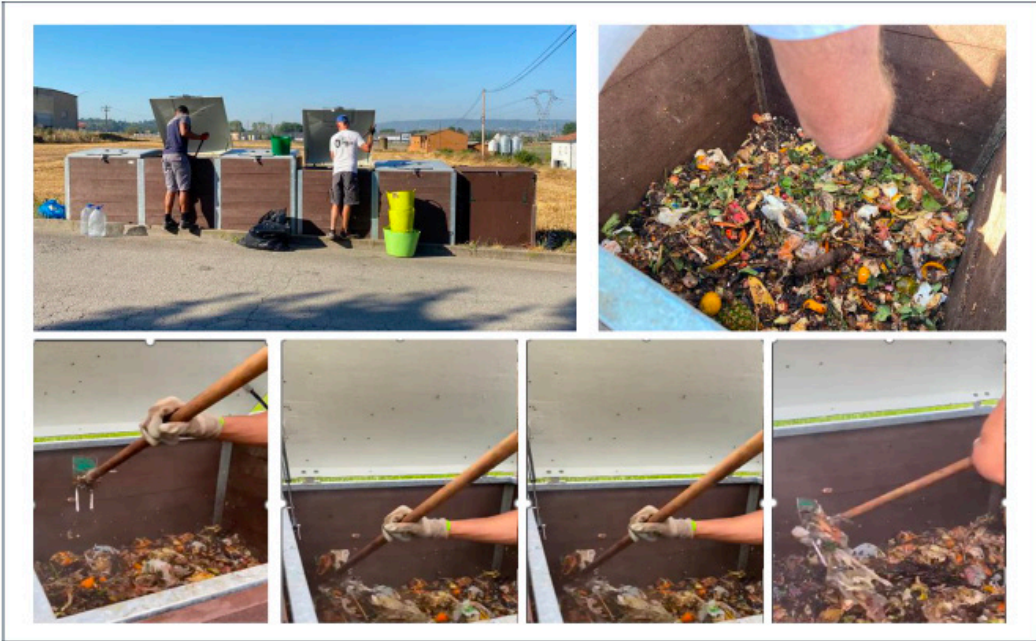


Figura 4.3. Proceso de aireación manual realizado en módulos de compostaje comunitario. La secuencia inferior muestra el movimiento de mezcla con herramienta de doble uso (azada y rastrillo), mientras que la parte superior contextualiza el sistema operativo y el estado de la mezcla antes de ser removida. Esta práctica es clave para mantener condiciones aeróbicas y evitar la compactación del material. Fuente: *Elaboración propia*

Transvase manual de la materia orgánica: Las Figuras 4.3 y 4.4 documentan visualmente el conjunto de actividades manuales realizadas durante el proceso de compostaje, con especial atención a la fase de transvase de la materia orgánica entre módulos. En estas imágenes se observa la participación simultánea de dos personas, lo cual resulta fundamental tanto para la eficiencia operativa como para la seguridad física del personal.

Durante el transvase, los trabajadores deben extraer manualmente la fracción orgánica semidegradada desde un módulo de maduración intermedio y trasladarla al módulo final. Esta acción implica el levantamiento y desplazamiento de materiales pesados,

generalmente húmedos y compactos, lo que requiere un esfuerzo físico constante. Aunque se utilizan herramientas como palas, horcas o aireadores (Figura 4.2), estas no eliminan del todo la carga física del proceso, especialmente cuando se trabaja con volumen acumulado.

En la Figura 4.4 (c), se aprecia en el transvase del segundo módulo de maduración al tercero, un cambio evidente en el aspecto del material: su coloración es más oscura, de tonos marrón café, los restos vegetales son casi imperceptibles y la liberación de vapor es mínima. Estas características indican que el compost ha avanzado en su proceso de estabilización, mostrando síntomas claros de una maduración adecuada.

Ambas actividades, aireación y transvase, e incluso el cargue y descargue del compost (Figura 4.5) destacan la importancia de contemplar mejoras ergonómicas y opciones de mecanización parcial, especialmente en contextos comunitarios donde el trabajo es manual y los recursos técnicos son limitados, pero donde la continuidad y calidad del proceso dependen directamente de la intervención humana.



Figura 4.4. Secuencia del proceso de trasvase manual entre módulos de compostaje comunitario. Las imágenes muestran distintas etapas de la operación: a). Vista de cada uno de los módulos de compostaje, b). Extracción de compost listo para tamizar c). Movimiento del material compostado desde el módulo de maduración intermedio y traslado al módulo de maduración final, d). Materia orgánica en un estado avanzado de maduración e) Movimiento de la materia orgánica en descomposición del primer módulo al segundo módulo de maduración. Fuente: *Elaboración propia*

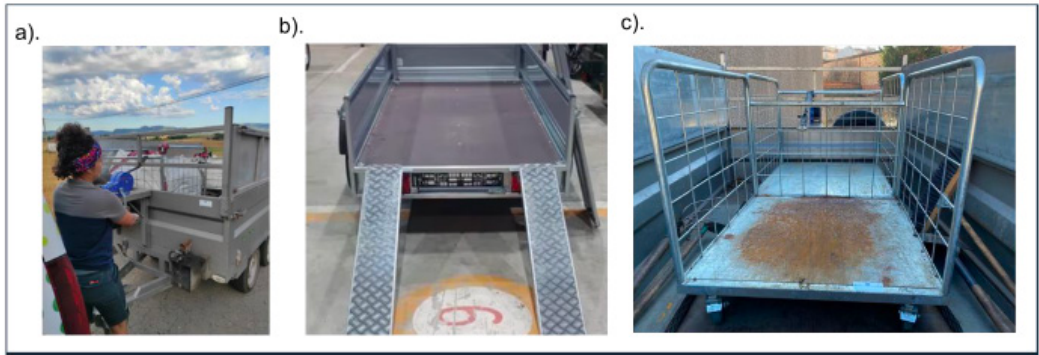


Figura 4.5. Elementos operativos utilizados para el cargue, descargue y traslado de compost en sistemas descentralizados. (a) Vista del remolque en operación durante la etapa de recolección, donde se observa el uso de una polea con mosquetón acoplado al extremo, que permite el enganche directo a los rollcontainers para facilitar su elevación y carga. (b) Ejemplo de rampa metálica acoplada al remolque, diseñada para permitir el ascenso y descenso de contenedores o big bags sin necesidad de manipulación directa, mejorando así la ergonomía del proceso. (c) Rollcontainer ubicado sobre el remolque, equipado con seguros de bloqueo en las ruedas traseras. Su estructura metálica y base sólida permiten una limpieza sencilla, y su movilidad facilita las operaciones de vaciado y posicionamiento dentro del punto de compostaje.
Fuente: Elaboración propia

Riesgos físicos y laborales escenarios 1A y 1B: Corresponden a sistemas de operación manual en los que tanto la aireación como los transvases se realizan sin asistencia mecánica. Si bien se cuenta con el uso de un remolque para la carga y descarga de estructurante y compost tamizado, esta herramienta solo reduce parcialmente la manipulación de cargas. Como consecuencia, estos escenarios presentan una elevada exposición a factores de riesgo ergonómico, especialmente por la frecuencia e intensidad del trabajo físico implicado.

Las actividades de aireación y transvase de material son las que demandan mayor dedicación horaria semanal (Figuras 4.3 y 4.4), como se observa en las Figuras correspondientes. En el escenario 1A (Figura 4.6 (a)), la aireación representa 732 horas/año, mientras que los transvases ocupan 112.5 horas/año, seguidos por 156 horas/año de desplazamientos y 104 horas/año de tamizado. En el escenario 1B (Figura 4. 6 (b)), la aireación se reduce a 477 horas/año, con 112.5 horas dedicadas a transvases, y 104/año horas tanto para desplazamientos como para tamizado

Esta reducción en el escenario 1B está asociada a la disminución en la frecuencia de atención y en la reorganización operativa semanal, lo que conlleva una menor carga horaria total. Sin embargo, en ambos casos, la distribución de tareas mantiene a la

aireación como la actividad de mayor carga laboral, lo que tiene implicaciones directas sobre la salud del personal operativo.

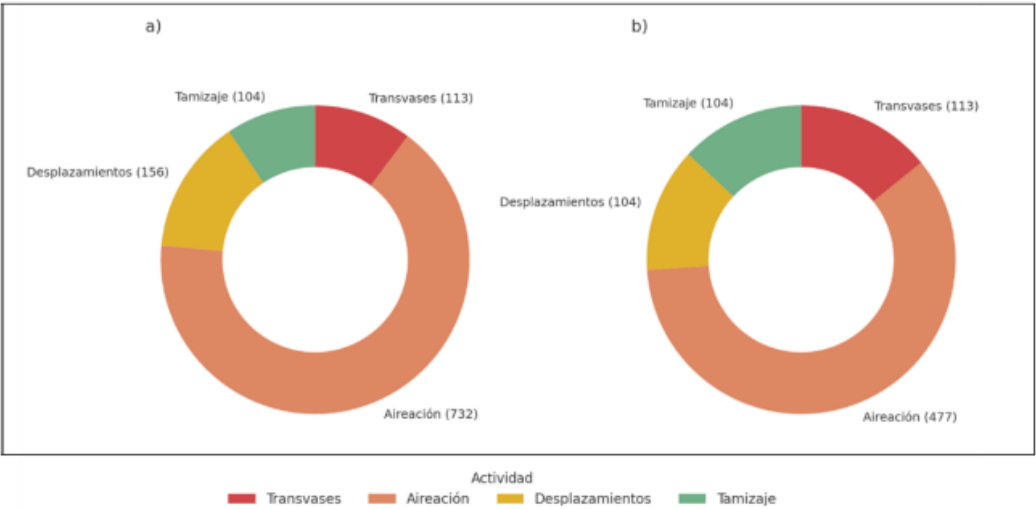


Figura 4.6. Escenario 1A y Escenario 1B dedicación [horas/año] por actividad. (a). Distribución del tiempo operativo anual Escenarios 1A. (b) Distribución del tiempo operativo anual Escenario 1B. *Fuente: Elaboración propia*

Relevancia del tiempo operativo por actividad: La comparación entre escenarios evidencia que el escenario 1A demanda una mayor cantidad de horas año en total (1105 horas/semana) en comparación con el escenario 1B (798 horas/año), lo cual está directamente relacionado con la frecuencia de atención (tres veces por semana en el caso de 1A y dos veces por semana en 1B). La evidencia operativa y los datos presentados justifican la incorporación de ayudas mecánicas como una estrategia para mitigar significativamente los riesgos ergonómicos asociados al SDC y como consecuencia los costos operativos serían reducidos.

Factores de riesgo identificados en escenarios manuales: En función del Decreto 487/1997 y los criterios del Ministerio de Trabajo e Inmigración (1997), se identificaron (Tabla 4.3) los siguientes factores de riesgo presentes en las actividades de aireación y transvase: Estos factores se traducen en una mayor probabilidad de lesiones musculoesqueléticas, especialmente en la región dorsolumbar, que es una de las zonas más comprometidas en este tipo de actividad física intensiva.

Tabla 4.3. Factores identificados que fomentan la aparición del riesgo por manipulación manual

Giros del tronco	Frecuencia de manipulación	Inclinación del tronco	Condiciones termo higrométricas extremas
Giro desde 30° hasta 90°	2 veces por minuto, duración > 1 h y < 2 h	Tronco inclinado	Temperaturas demasiado cálidas o demasiado bajas

Elaboración propia a partir de Ministerio de trabajo y economía social (2024)

4.1.2.2. Escenario 2A y 2B – Operación manual con un transvase

Con el objetivo de reducir el esfuerzo físico del personal operativo y optimizar el tiempo de trabajo, se implementaron tres modificaciones clave en la infraestructura:

Eliminación de un transvase: Se incorporaron dos carros con big bag en los módulos de maduración, permitiendo así suprimir uno de los dos transvases originalmente requeridos. La operación consistía en retirar el carro con compost maduro del tercer módulo y trasladarlo directamente al centro de tamizaje. El carro ubicado en el segundo módulo se desplazaba al tercero, mientras que la materia orgánica del módulo de aportación se transfería al segundo módulo utilizando un carro con big bag vacío. De esta forma, se mantenía un único transvase (del primer al segundo módulo), preservando la aireación mediante mezcla manual, tal como en los escenarios 1A y 1B (Figura 4.7).

Sustitución del cajón de madera por el uso mecanizado del remolque con pluma para el agente estructurante: El almacenamiento del estructurante, que antes se realizaba en un cajón de madera, fue reemplazado por la utilización del remolque con pluma. Antes de iniciar cada jornada operativa, se cargaba el estructurante en el remolque, permitiendo su disponibilidad continua durante la operación. Esta modificación eliminó la necesidad de transportar manualmente el big bag hasta el cajón de almacenamiento, reduciendo significativamente el esfuerzo físico y el tiempo de disposición del material (Figura 4.8).

Uso exclusivo del remolque con pluma: Las actividades de carga que anteriormente se realizaban mediante poleas fueron sustituidas por un sistema de remolque equipado con pluma hidráulica. Esta mejora permitió la manipulación mecánica del compost y del estructurante (carga y descarga), eliminando el esfuerzo físico asociado a estas tareas (Figura 4.9).

- **Escenario 2 A:** Para estas actividades se requerían dos personas con una frecuencia de operación de tres veces por semana.
- **Escenario 2B:** Las actividades en este escenario eran iguales que en el escenario 2A, con la única diferencia de la frecuencia, que correspondía a 2 veces por compostador, afectando la cantidad de horas/año.



Figura 4.7. Implementación de rollcontainers en escenarios 2A y 2B para evitar el transvase manual entre módulos. (a) Movimiento de la materia orgánica hasta el rollcontainer segundo módulo de maduración; (b) ubicación de los rollcontainers dentro de los dos módulos de maduración, lo que permite mantener el compost contenido y facilitar su manipulación sin trasvase; (c) aspecto del material compostado en el último módulo de maduración, con coloración oscura, textura homogénea y fragmentos parcialmente estabilizados, indicativos de un proceso avanzado de compostaje. Fuente: Elaboración propia

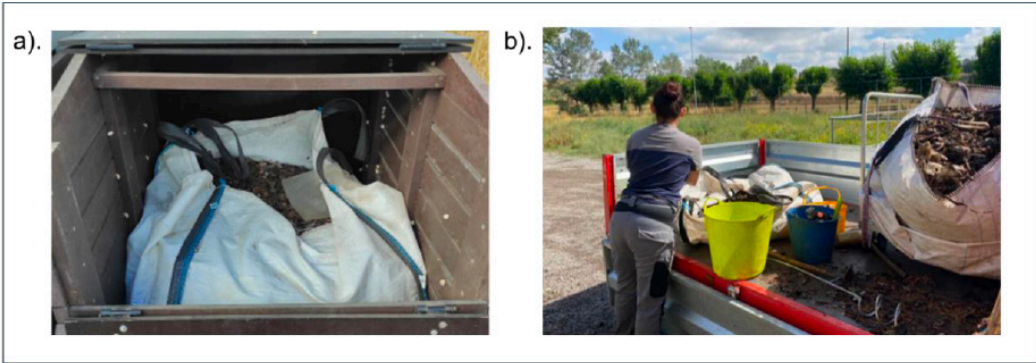


Figura 4.8. modificación en la estrategia de almacenamiento y suministro de estructurante. (a) Cajón de estructurante ubicado in situ dentro del área de compostaje, utilizado originalmente para almacenar y extraer manualmente la poda triturada. (b) Nuevo enfoque operativo que elimina el cajón fijo y reemplaza el almacenamiento por carga directa del estructurante en el remolque. Esta estrategia permite reducir tiempos de operación y esfuerzo físico, al evitar el doble manejo del material y facilitar su distribución en los distintos puntos de compostaje comunitario. Fuente: Elaboración propia

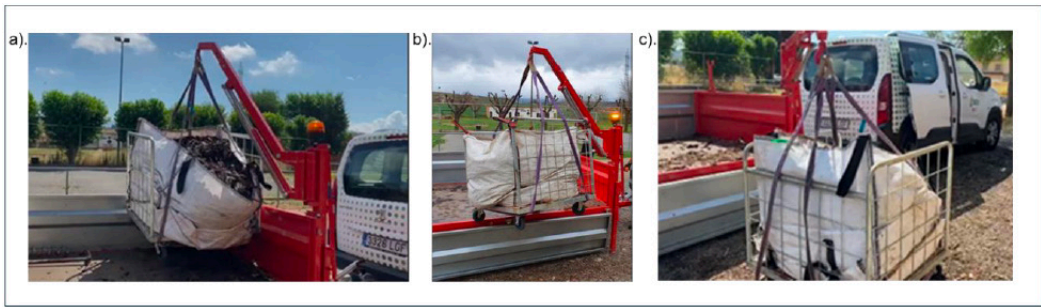


Figura 4.9. carga y descarga mecanizada mediante pluma hidráulica instalada en remolque. (a–b) Funcionamiento operativo de la pluma acoplada al tráiler, utilizada para elevar y descargar big bags de compost sin necesidad de esfuerzo físico directo por parte del operario. Esta herramienta permite optimizar tiempos y mejorar la ergonomía del sistema de recogida. (c) Vista lateral del conjunto operativo, donde se observa la furgoneta de apoyo logística utilizada en las tareas de compostaje comunitario. El remolque se conecta a la furgoneta mediante un enganche tipo bola (remolque estándar), lo que permite su desplazamiento entre los distintos puntos de compostaje de forma eficiente. *Fuente: Elaboración propia*

Riesgos físicos y laborales Escenarios 2A y 2B: Corresponden a sistemas de operación semimanual, en los que la aireación se realiza manualmente y el único transvase requerido se ejecuta con asistencia mecánica mediante rollcontainer, lo que contribuye a reducir parcialmente la manipulación directa de cargas pesadas. Adicionalmente, se cuenta con el uso de un remolque con pluma para la carga y descarga tanto del estructurante como del compost tamizado, y se eliminó uno de los dos transvases presentes en los escenarios manuales anteriores. Si bien estas mejoras representan un avance en términos de reducción de esfuerzo físico asociado al transporte de materiales, la actividad de aireación continúa representando un riesgo ergonómico significativo, debido a la frecuencia e intensidad del trabajo manual requerido. Este riesgo se mantiene como uno de los factores críticos de operación en ambos escenarios, dado que la tarea demanda una alta dedicación horaria.

En términos comparativos, las horas/año destinadas al transvase se redujeron respecto a los escenarios 1A y 1B (Escenario 1A: 112,5 h frente a Escenario 2A: 56,7 h; Escenario 1B: 113 h frente a Escenario 2B: 57 h). No obstante, las horas dedicadas a la aireación permanecen elevadas, tal como se evidencia en los datos operativos presentados en la Figura 4.10. Esta situación refuerza la necesidad de considerar estrategias adicionales para automatizar o asistir mecánicamente la aireación, a fin de minimizar la exposición a factores de riesgo y mejorar la eficiencia del sistema.

Relevancia del tiempo operativo por actividad: En el escenario 2A, la aireación representa 732 horas/año, mientras que los transvases ocupan 57 horas/año, seguidos por 156 horas de desplazamientos y 104 horas de tamizado. En el escenario 2B, la aireación se reduce a 477 horas/año, con 57 horas dedicadas a transvases, y 104 horas tanto para desplazamientos como para tamizado. Esta reducción en el escenario 2B está asociada a la disminución en la frecuencia de atención y en la reorganización operativa semanal, lo que conlleva una menor carga horaria total.

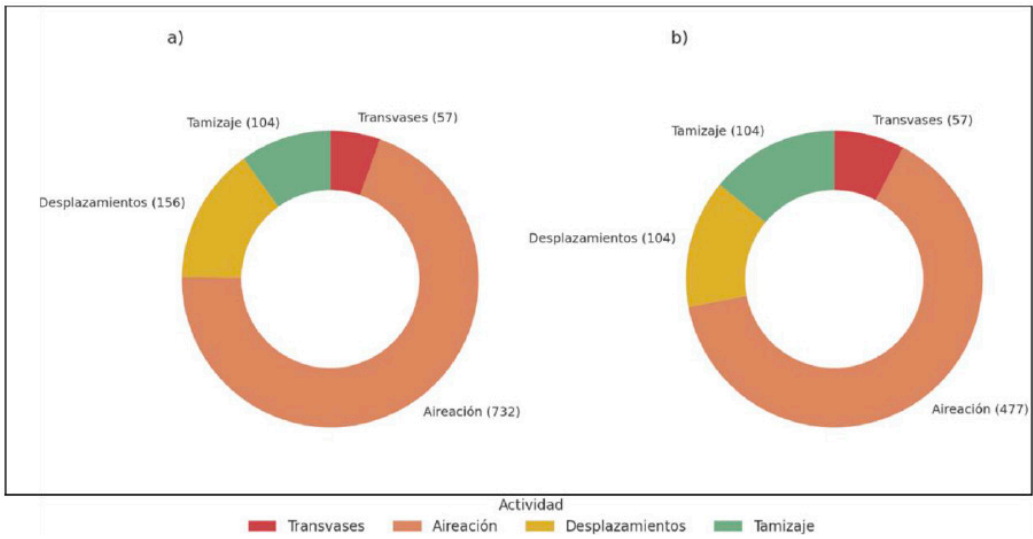


Figura 4.10. Escenario 2A y Escenario 2B dedicación horas/año por actividad. (a). Distribución del tiempo operativo anual Escenarios 2A. (b) Distribución del tiempo operativo anual Escenario 2B. *Fuente: Elaboración propia*

4.1.2.3. Escenario 3A – Operación mecanizada sin transvases (optimización inicial)

Tras la implementación de los escenarios manuales y semimanuales (1A, 1B, 2A y 2B), se introdujeron los escenarios mecanizados 3A y 3B, en los cuales se incorporaron herramientas técnicas que permitieron optimizar la operación, profesionalizar el proceso y reducir significativamente el esfuerzo físico del personal operador.



Figura 4.11. Herramientas utilizadas en los escenarios mecanizados del SDC. a) Camión con grúa en operación: mecanizada. con sistema de protección: el camión está equipado con un aro de soporte que permite fijar la mezcladora de manera segura cuando no está en uso o durante los desplazamientos, protegiendo la maquinaria de posibles daños. Brazo hidráulico con la mezcladora acoplada en la punta, lista para introducirse en el compostador y realizar la aireación de forma completamente (b) Camión con brazo hidráulico retraído: se muestra la parte frontal del vehículo junto a un operario del equipo municipal de mantenimiento, quien sostiene el mando a distancia con el que se controla toda la operación. (c) Mezcladora en funcionamiento: detalle del movimiento helicoidal de la herramienta dentro del compostador, generando aireación homogénea y facilitando el proceso de descomposición de la materia orgánica. *Fuente: Elaboración propia*

Teniendo en cuenta el análisis de la dedicación horaria en los escenarios manuales y semi manuales, y considerando que las actividades de aireación y transvase representan las tareas de mayor exigencia física, se decidió, en coordinación con el Ayuntamiento de LMR y el centro tecnológico BETA implementar la mecanización del proceso de aireación (Figura 4.12).

Para ello, se incorporó un camión equipado con grúa y mezcladora, cuya operación se realiza mediante control remoto, permitiendo una aireación eficiente, homogénea y sin esfuerzo físico, además de una notable reducción del tiempo requerido, la Figura 4.11 ilustra las herramientas principales empleadas en los escenarios mecanizados, centrados en la profesionalización de la operación y la reducción del esfuerzo físico en el proceso de compostaje.



Figura 4.12. Equipo de operativo Ayuntamiento LMR y Centro tecnológico Beta. *Fuente: Elaboración propia*

Asimismo, el traslado del material al centro de tamizaje dejó de realizarse con remolques, como en los escenarios anteriores, siendo sustituido por el mismo camión, que integra un gancho para la carga y descarga directa del compost. Este escenario elimina completamente los transvases entre módulos, ya que toda la materia orgánica realiza su proceso de compostaje dentro de un único módulo. Una vez que el módulo de aportación se llena, se cierra a los usuarios y comienza la fase de maduración sin que el material sea trasladado. Cuando el compost está listo para ser tamizado, el módulo correspondiente se vacía y pasa a ser nuevamente el módulo de aportación.

Adicionalmente, se observó que distribuir la operación de los compostadores en dos días a la semana por unidad, en lugar de atender la totalidad en tres días, resultaba más eficiente desde el punto de vista ergonómico, al reducir el nivel de agotamiento

del personal. Como resultado, se eliminó la frecuencia de atención de tres veces por semana, adoptando un esquema de dos veces por semana por compostador, lo que equivale a una operación distribuida en cuatro días laborales por semana. Esta reorganización operativa, junto con la mecanización del sistema, permitió reducir significativamente las horas de trabajo y optimizar el uso del recurso humano, siendo suficiente una sola persona para llevar a cabo todas las tareas del proceso.

En cuanto a la fase de extracción del compost para tamizarlo, se realiza mediante el movimiento directo del material desde el compostador hacia un big bag de 500 kg ubicado dentro de un rollcontainer. Para ello, se desinstala la mezcladora del camión y se acopla un gancho de elevación en la grúa, lo que permite cargar y descargar el material de manera rápida, segura y sin esfuerzo físico, facilitando su posterior traslado al centro de tamizado.

Este escenario representa una versión optimizada del proceso, resultado de tres años de investigación y mejoras progresivas en la infraestructura, el tipo de operación y la organización del trabajo. La mecanización ha permitido reducir significativamente el esfuerzo físico, el número de horas dedicadas y los costos asociados, sin comprometer la aireación necesaria para el proceso, lo que garantiza condiciones óptimas para la actividad microbiana. Actualmente, este modelo de operación corresponde al escenario en funcionamiento en el municipio de LMR y constituye uno de los avances más relevantes obtenidos en el marco de esta investigación.

La Figura 4.13 muestra el funcionamiento del escenario 3A, caracterizado por la implementación de mecanización parcial en las operaciones clave del sistema descentralizado con gestión profesionalizada. Este modelo elimina transvases, reduce el esfuerzo físico y optimiza la eficiencia operativa mediante herramientas mecánicas controladas remotamente.



Figura 4.13. Esquema operativo del escenario 3A del SDC en LMR. a) Distribución del sistema: módulos diferenciados para la aportación y maduración de la fracción orgánica, que se alternan de forma cíclica según el avance del proceso. (b) Mezclador mecánico: equipo que se introduce en el módulo mediante grúa y cuyo movimiento helicoidal permite airear y homogeneizar el material sin necesidad de intervención física directa. (c) Transvases evitados: el sistema está diseñado para que el módulo de aportación pase automáticamente a fase de maduración sin mover la materia entre módulos, eliminando una de las tareas más exigentes físicamente. (d) Camión con grúa hidráulica: permite la instalación y retiro del mezclador, así como la carga y descarga de big bags con compost. Todo el sistema es operado mediante control remoto, reduciendo el esfuerzo humano y el tiempo de trabajo. *Fuente: Elaboración propia*

Riesgos físicos y laborales escenario 3 A: Representa un avance significativo en la reducción de los riesgos laborales derivados del proceso de compostaje comunitario, al incorporar un sistema mecanizado para la aireación y la gestión de materiales. La introducción de un camión equipado con grúa y mezcladora, operado por control remoto, ha permitido eliminar por completo los transvases manuales y reducir de forma sustancial la manipulación directa de cargas pesadas, lo que se traduce en un entorno de trabajo más seguro y ergonómico.

Riesgos evitados por la mecanización: Gracias al rediseño del proceso, se eliminan o controlan los riesgos identificados en la Tabla 4.4. Comparativa de riesgos ergonómicos por tipo de operación en SDC.

Riesgos controlados: Aunque el escenario representa una mejora sustancial en ergonomía y seguridad, se mantienen algunos riesgos menores, ahora asociados principalmente al uso de maquinaria:

- Riesgos mecánicos: Pueden presentarse atrapamientos o golpes si no se manipulan adecuadamente los sistemas de gancho y grúa, aunque estos riesgos están controlados mediante formación y protocolos de seguridad.
- Riesgos eléctricos o técnicos: Derivados del uso del mezclador o fallos operativos puntuales en el sistema hidráulico o eléctrico del camión.

Relevancia del tiempo operativo por actividad: En términos comparativos, las horas anuales destinadas al transvase y a la aireación se redujeron significativamente en el escenario 3A en relación con los escenarios 2A y 2B. Específicamente, las horas asociadas al transvase pasaron de 57 h/año en el escenario 2B a 43 h/año en el escenario 3A, mientras que las horas destinadas a la aireación se redujeron de 477 h/año a 412 h/año. Esta disminución se debe a la mecanización progresiva del sistema, particularmente en las actividades de aireación y transvases de materiales, tal como se muestra en los datos operativos representados en la Figura 4. 14.

Cabe destacar que, en el caso del escenario 3A, el tiempo dedicado a la aireación incluye no solo la operación mecánica de mezcla, sino también el tiempo necesario para preparar el equipo y posicionarlo correctamente sobre el compostador. Por otro lado, las actividades de desplazamiento y tamizado mantienen un valor constante de 104 h/año, ya que estas fases han estado mecanizadas desde la puesta en marcha inicial del sistema y no han sido objeto de cambios operativos en este escenario.

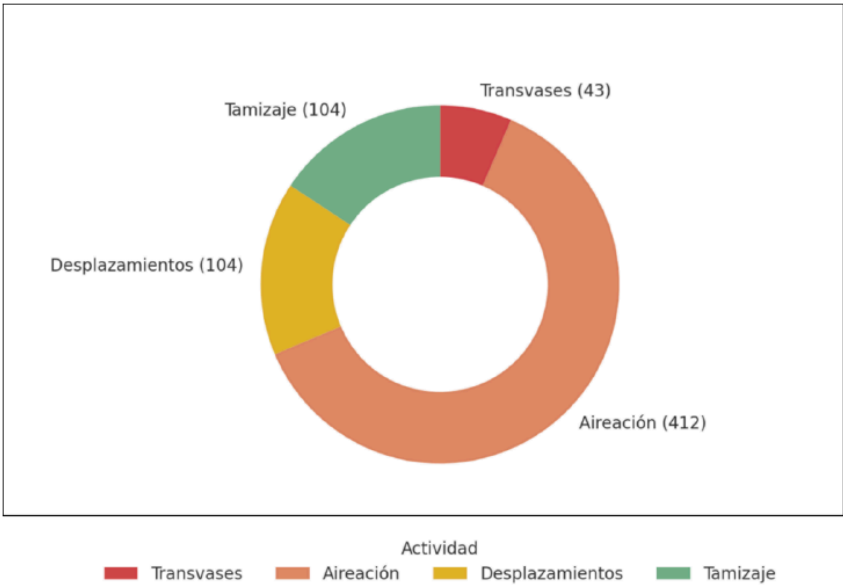


Figura 4.14. Escenario 3A horas/año por actividad. Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4. Escenario 3B – Operación mecanizada con mejoras en el prototipo circular

Considerando las limitaciones observadas en los escenarios previos —principalmente relacionadas con la capacidad de carga, la ergonomía en la operación manual, las horas de trabajo requeridas y el aumento de personal necesario—, y en coordinación con el Ayuntamiento, se implementó un prototipo circular de hierro. A diferencia del escenario 3A, en el que se introdujeron mejoras mecanizadas sobre el sistema rectangular existente, el prototipo circular representó una modificación estructural más profunda, orientada a rediseñar el formato del compostador.

La geometría circular permitió mejorar la homogeneidad en la distribución y aireación de la materia orgánica, así como optimizar las operaciones de aireación. Además, la incorporación de una compuerta inferior constituyó una innovación clave, ya que facilitó el descargue del compost sin necesidad de manipulación manual intensiva de la tierra. Este diseño también mejoró el cargue y descargue del material en el camión para su traslado al área de postprocesamiento, reduciendo significativamente el esfuerzo físico de los operarios y los tiempos de operación.

Con estas adaptaciones, el prototipo buscó superar las limitaciones detectadas en fases anteriores, avanzando hacia un sistema más ergonómico, eficiente y fácilmente integrable en la gestión mecanizada del compostaje comunitario.

El contenedor circular de hierro es un prototipo diseñado con un gancho en la parte superior y una puerta en la parte inferior. Las paredes de la plancha circular están perforadas con múltiples cuadrados de 1 cm² para que circule el aire. En este escenario, todas las fases del proceso siguen teniendo lugar dentro del compostador. La forma circular del prototipo permite una homogeneización completa de la materia orgánica, evitando puntos muertos durante la mezcla. El gancho superior permite elevar el material mecánicamente mediante una grúa, mientras que la puerta inferior permite descargar el material directamente en un big bag.

Con la mezcla mecánica (escenarios 3A y 3B) todas las fases de compostaje se producen en un solo módulo. Una vez que el módulo de entrada está lleno, se cierra a los usuarios y comienza la maduración sin que el material se mueva entre los módulos. El módulo con el compost listo para tamizar se convierte en el nuevo módulo de entrada. Esta mezcla asegura la aireación necesaria, eliminando las transvases excepto cuando el compost está listo para la extracción y el tamizado. En las Figuras 4.15 y 4.16 muestran las herramientas y maquinaria utilizadas por etapa. En este escenario, cuando el compost está listo el bidón de hierro circular es elevado mediante un gancho con ayuda de la grúa. Una vez suspendido se abre la tapa inferior como se observa en la Figura 4.16 para descargar el compost en un big bag de 500 kg, el cual se carga al camión y se transporta al centro de post procesamiento. En cuanto al traslado del material a la zona de tamizaje (posprocesamiento), se hace de igual manera que en el escenario 3A.

Este escenario muestra un mayor grado de actividades mecanizadas resultando ser el más eficiente en términos de reducción de cargas de manipulación (inferiores a los del escenario 3A). Sin embargo, este escenario surge de un diseño experimental, que requiere más investigación en términos de rediseño de un compostador circular que facilite el uso del mezclador y que tenga las características de manejo del tambor de hierro descritas anteriormente.

Para llevar a cabo las actividades operativas, solo se requiere de una persona en las mismas frecuencias que en el escenario 3A. la mezcla se realiza de manera mecánica y más eficiente, debido al cambio en la infraestructura con la instalación de contenedores

circulares de hierro perforado dentro del compostador que facilitaron aún más el proceso. Al igual que en el Escenario 3A, se eliminaron los traslados, reduciendo aún más los esfuerzos físicos.

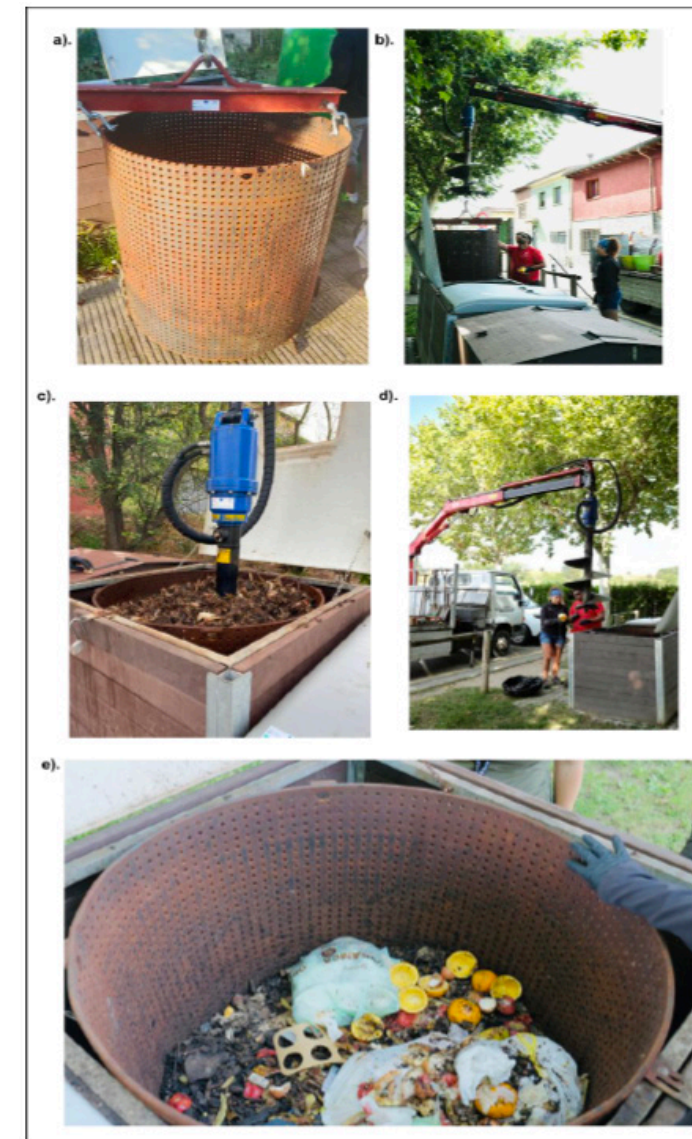


Figura 4.15. Operación mecanizada del compostador con prototipo circular y mezcladora hidráulica. Secuencia visual del proceso de aireación mecanizada en el escenario 3B, que incorpora un tambor metálico perforado instalado dentro del compostador y una mezcladora hidráulica acoplada a una grúa: (a) Prototipo de tambor de hierro perforado con gancho superior y compuerta inferior. (b) Brazo hidráulico extendido con mezcladora y gancho elevador del bidón de hierro. (c) Aireación mecanizada mediante sinfín vertical controlado remotamente, operado por personal técnico. (d) Visión general del sistema en funcionamiento, con la grúa sosteniendo a través del control de mando. (e) Vista de la materia orgánica dispuesta en el bidón de hierro compostador de aportación *Fuente: Elaboración propia*

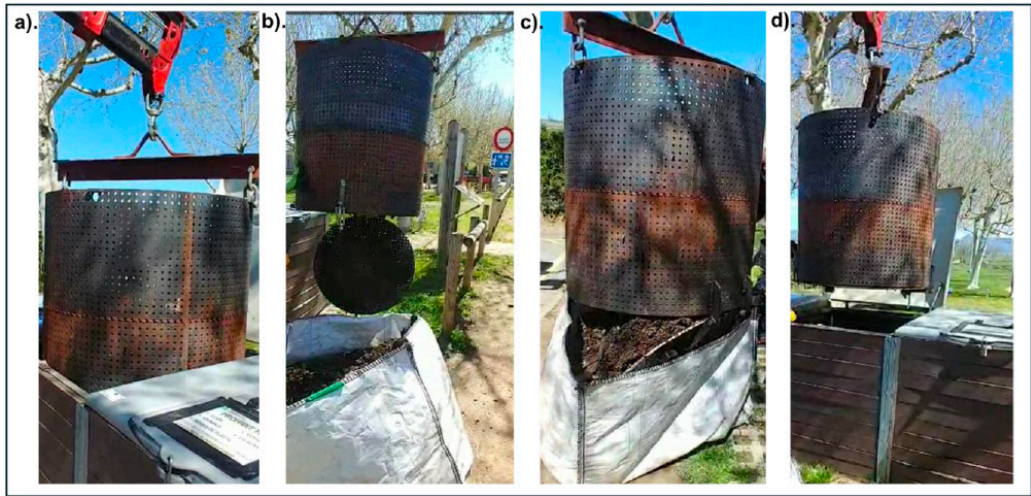


Figura 4.16. Prototipo circular de hierro para compostaje mecanizado en el escenario 3B. Secuencia del funcionamiento del tambor metálico perforado utilizado en el escenario 3B, diseñado para facilitar la aireación y el vaciado mecánico del compost: (a) Vista del gancho superior que permite su elevación mediante grúa, (b) Apertura de la compuerta inferior para la descarga del material, (c) Descarga directa del compost maduro en un big bag ubicado en un rollcontainer, (d) Detalle de las paredes perforadas del tambor (orificios de 1 cm²), que favorecen la aireación pasiva durante el proceso de maduración. Fuente: *Elaboración propia*

Riesgos físicos y laborales escenario 3B: Constituye la versión más optimizada del sistema, gracias a la incorporación de bidones de hierro en un proceso totalmente mecanizado que minimiza los riesgos laborales. La aireación mecánica y el vaciado mediante grúa eliminan la necesidad de esfuerzo físico, evitando tanto maniobras ergonómicamente riesgosas como la formación de puntos muertos por falta de oxígeno, lo que garantiza un entorno de trabajo más seguro y eficiente.

Riesgos eliminados gracias a la mecanización: Los factores de riesgo identificados en los diferentes escenarios se sintetizan en la Tabla 4.3 Comparativa de riesgos ergonómicos por tipo de operación en SDC, donde se aprecia la evolución de los niveles de exposición en función del tipo de operación implementado (manual, semimecánica o mecanizada).

- **Riesgos controlados:** Mecánicos: Posibles atrapamientos o golpes se previenen con protocolos de seguridad.
- **Técnicos:** Riesgos eléctricos o hidráulicos se gestionan con mantenimiento y personal capacitado.

Relevancia del tiempo operativo por actividad: En comparación con el escenario 3A, el escenario 3B muestra una reducción significativa en las horas anuales dedicadas a las actividades de transvase y aireación (Figura 4.17). En particular, las horas destinadas al transvase disminuyeron de 57 h/año a 28 h/año, y las de aireación pasaron de 477 h/año a 295 h/año. Esta mejora se atribuye al uso del bidón de hierro, que optimiza el funcionamiento de la mezcladora mecánica y facilita las operaciones gracias a su diseño, que permite ser suspendido mediante un gancho y descargado eficientemente a través de compuertas inferiores.

Por su parte, las tareas de desplazamiento y tamizado se mantienen en 104 h/año, dado que ya estaban completamente mecanizadas desde el inicio del sistema y no han requerido modificaciones operativas en este escenario.

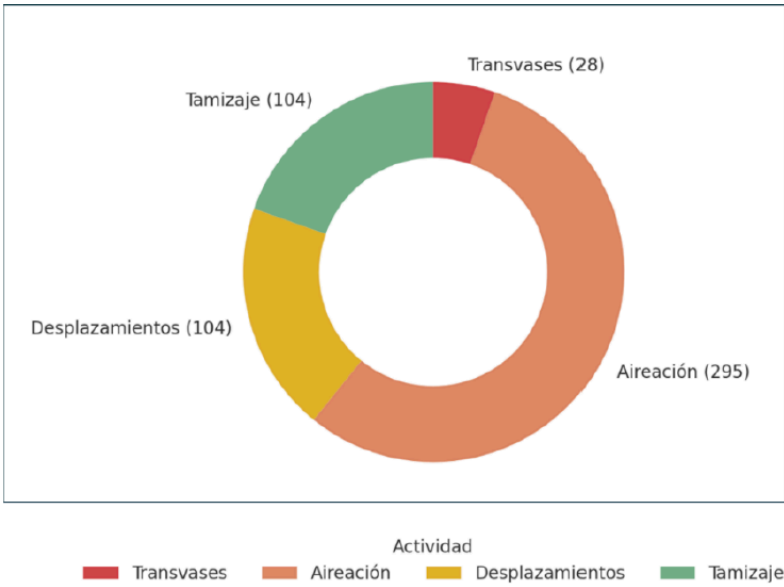


Figura 4.17. Escenario 3B horas/año por actividad. Fuente: *Elaboración propia*

4.1.2 Análisis y selección del escenario óptimo

El análisis transversal de los escenarios operativos implementados permite comprender, de forma integrada, cómo evolucionaron las condiciones técnicas del sistema de SCD (Figura 4.18) a lo largo del tiempo. A través de este enfoque, se comparan indicadores clave como horas de trabajo por actividad, distribución del esfuerzo físico, frecuencia

de intervención y redistribución de tareas, lo cual permite identificar los escenarios más eficientes y sostenibles desde el punto de vista operativo.

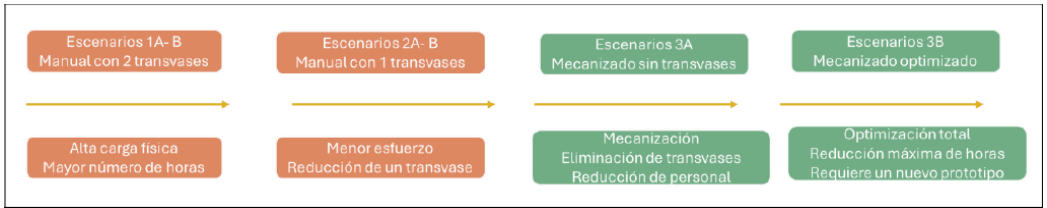


Figura 4.18. Evolución de escenarios operativos y beneficios técnicos. Fuente: Elaboración propia

4.1.2.1. Matriz de criterios técnicos y operativos

La Tabla 4.4 sintetiza la dedicación horaria anual desglosada por actividad operativa para cada uno de los seis escenarios evaluados. Esta información permite visualizar de forma comparativa la carga de trabajo y la evolución de la eficiencia operativa asociada a cada modalidad (manual, semimanual y mecanizada), sirviendo como base para el análisis transversal posterior.

Se observa una reducción progresiva del tiempo total asociado a tareas operativas clave (aireación, transvase, desplazamientos y tamizado) conforme se incorporan herramientas mecánicas y mejoras estructurales en el sistema de compostaje descentralizado.

Tabla 4.4. Comparativa de horas-persona anuales requeridas por actividad y escenario operativo

Actividad	Escenario 1A	Escenario 1B	Escenario 2A	Escenario 2B	Escenario 3A	Escenario 3B
Aireación	732.0	477.0	732	477	412	295
Transvase	112.5	112.5	57	57	43	28
Desplazamientos	156.0	104.0	156	104	104	104
Tamizado	104.0	104.0	104	104	104	104
Total, horas/año	1105.0	798.0	1049	742	663	531

Distribución temporal de actividades por escenario: La Figura 4.19 presenta la evolución del tiempo de trabajo anual por actividad (transvases, aireación, desplazamientos y tamizaje) en cada uno de los seis escenarios evaluados. Se evidencia que las actividades con mayor variabilidad entre escenarios son la aireación y los transvases, especialmente en los contextos manuales y semimanuales. Los escenarios con operación tres veces por semana por compostador (1A, 2A) muestran los mayores tiempos acumulados, mientras que aquellos con frecuencias reducidas (1B, 2B) o mecanización (3A, 3B) presentan una disminución progresiva.

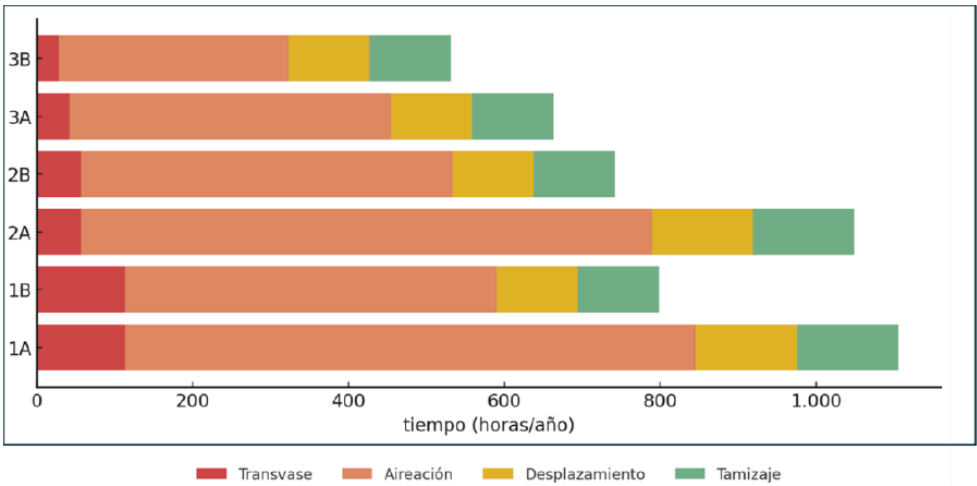


Figura 4.19. Distribución de tiempo por actividad y escenario. Fuente: Elaboración propia

Distribución porcentual de horas por actividad: El gráfico de barras 100 % apiladas (Figura 4.20) muestra cómo se distribuye el peso relativo de cada actividad sobre el total de horas anuales en cada escenario. En los primeros escenarios (1A y 2A), la aireación representa más del 60 % del tiempo, reflejando la alta carga física y operativa de esta tarea en sistemas manuales. A medida que se incorporan mejoras mecánicas (2B, 3A y 3B), esta proporción disminuye significativamente, al tiempo que se equilibra el peso de las tareas restantes. Los transvases también muestran una reducción proporcional importante, especialmente en los escenarios mecanizados, donde se eliminan por completo.

Por el contrario, las actividades de tamizaje y desplazamientos mantienen proporciones constantes entre escenarios, dado que estas fases han estado mecanizadas desde el inicio del sistema y no se vieron modificadas por los rediseños operativos.

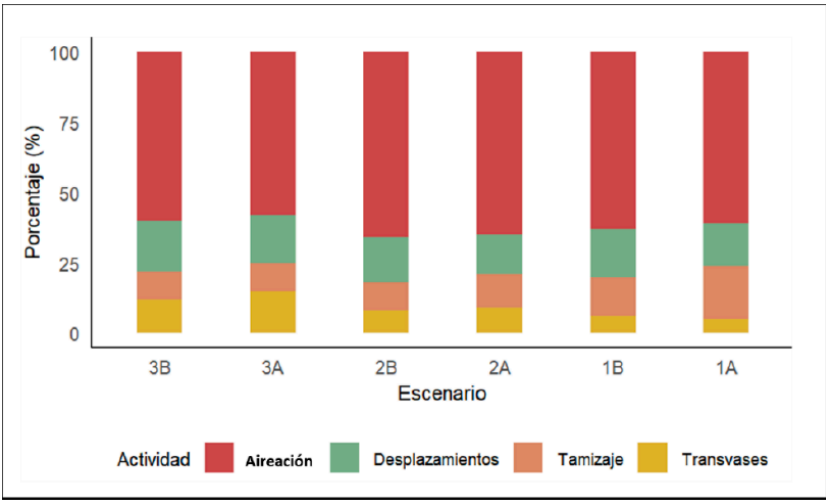


Figura 4.20. Distribución porcentual de horas operativas por actividad. Fuente: Elaboración propia

Reducción acumulada de horas: La Figura 4.21 representa la reducción acumulada de horas anuales respecto al escenario base (1A). Se observa una ganancia progresiva de eficiencia operativa, destacando el escenario 3B como el más eficiente, con una disminución total de 574 horas/año. Esta reducción es resultado de una mejora integral del proceso, que combina mecanización, rediseño de infraestructura y optimización de la frecuencia de atención.

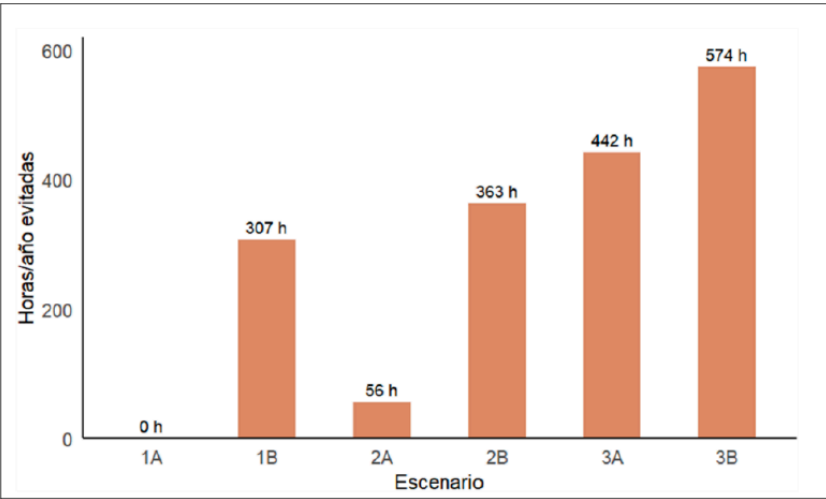


Figura 4.21. Reducción acumulada de horas operativas respecto al escenario 1 A. Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2. Comparación entre escenarios mecanizados y manuales

La comparación entre escenarios manuales y mecanizados, en función del tiempo requerido por actividad, evidencia una mejora sustancial en la eficiencia operativa al incorporar tecnologías mecánicas. El análisis del tiempo total anual dedicado a las tareas críticas —aireación y transvase— muestra reducciones significativas que refuerzan la viabilidad técnica de los escenarios mecanizados.

En los escenarios manuales (1A y 2A), los transvases consumen aproximadamente 113 horas/año, mientras que en escenarios semimanuales (1B y 2B) esta cifra se reduce a 57 horas/año. Por su parte, en los escenarios mecanizados (3A y 3B), este tiempo baja aún más, hasta 43 y 28 horas/año, respectivamente. Esto representa una reducción del 75 % en tiempo de transvase si se compara el escenario más básico (1A) con el más avanzado (3B).

Un comportamiento similar se observa en la actividad de aireación. Mientras que los escenarios manuales demandan hasta 732 horas/año, los semimanuales requieren 477 horas/año, y los mecanizados logran disminuir esta cifra a 412 y 295 horas/año. En este caso, la reducción alcanza el 60 % al comparar el escenario 1A con el 3B. (Figura 4.21)

La Figura 4.22 muestran de forma clara esta evolución. En ella se observa no solo la disminución total de horas por actividad, sino también la contribución relativa de cada mejora operativa a la eficiencia global del sistema. Esta evidencia refuerza la elección de los escenarios 3A y 3B como los más adecuados desde el punto de vista técnico, al reducir las tareas más demandantes y redistribuir el tiempo de forma más equilibrada entre actividades, contribuyendo así a un modelo más sostenible, seguro y replicable.

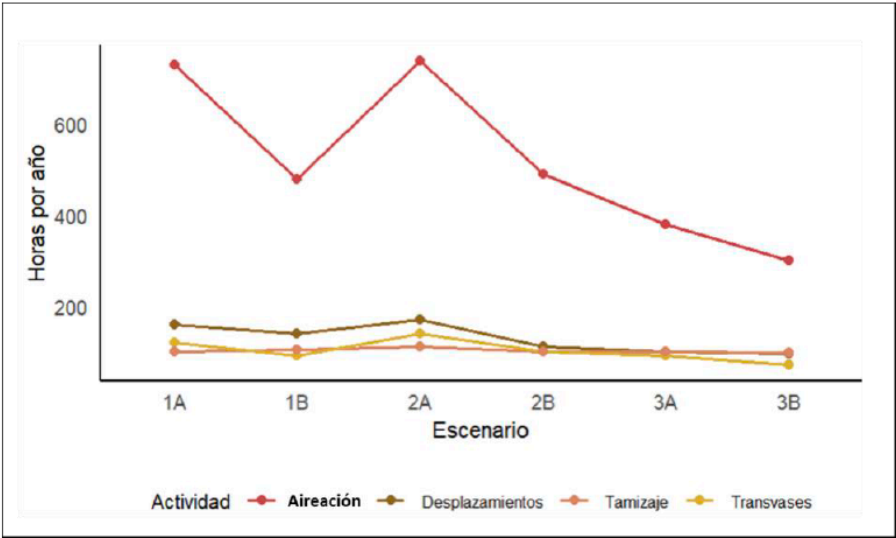


Figura 4.22. Reducción de horas por actividad según escenario. Fuente: Elaboración propia

Factores técnicos con impacto en el OPEX por escenario: La Tabla 4.5 presenta las horas de trabajo del recurso humano y los componentes operativos vinculados al uso de maquinaria, los cuales representan variables clave que inciden directamente en el OPEX del SDC. El análisis detallado de estos costos se abordará en la sección de resultados económicos.

Los recursos empleados se dividen según el tipo de frecuencia de operación. El uso de combustible diesel es necesario, el cual varía según los km realizados por día (16 km/día), así como el recurso humano.

La Tabla 4.5 consolida los recursos operativos requeridos para cada uno de los seis escenarios evaluados. Incluye el número de personas involucradas, la frecuencia de operación semanal, las horas estimadas por día y por año, así como el consumo de diésel en kilómetros y litros por año (cuando corresponde).

Tabla 4.5. Recursos operativos por escenario

Escenario	Frecuencia de operación	Personal requerido	Horas/ persona/día	Horas/ persona/año	Consumo diésel (km/año)	Consumo diésel (L/año)
1A	3 veces/semana	2	7.0	1105	2500	n/d
1B	2 veces/semana	2	4.0	798	1716	n/d
2A	3 veces/semana	2	7.0	1049	2500	n/d
2B	2 veces/semana	2	3.5	742	1716	n/d
3A	2 veces/semana	1	3.2	663	1716	1333
3B	2 veces/semana	1	2.5	531	1716	1333

Fuente: Elaboración propia

En el paso del escenario 1A al 3B, las horas de trabajo por persona y día se redujeron de 7 a 2,5 (casi tres veces menos). Sin embargo, al expresarlo en horas/persona/año, la disminución fue de 1105 a 531 (aproximadamente la mitad). Este indicador refleja la dedicación anual de un único operario; por ello, en escenarios con más personal, como el 1A, el total de horas para el sistema se duplicaba, alcanzando 2210 h/año. Es de resaltar que esta duplicación no respondía a un aumento real de la carga operativa, sino a las limitaciones físicas de la tarea: una sola persona no podía sostener la labor de forma continua, de modo que mientras un operario trabajaba el otro descansaba. No obstante, ambos recibían la misma remuneración por el número total de horas, lo que implicaba un incremento en los costes laborales sin un aumento equivalente en la productividad. En cambio, en escenarios como el 3B, con un único operario y un sistema optimizado, las 531 h/año representaban tanto el valor individual como el total, reflejando una mayor eficiencia en la asignación de recursos.

Comparación cualitativa de desempeño. Para complementar el análisis técnico, se presenta una matriz comparativa (Tabla 4.6) con criterios clave como esfuerzo físico, riesgos ergonómicos, redistribución de tareas, viabilidad de implementación y eficiencia global. Si bien el escenario 3B representa el modelo más optimizado en términos de desempeño técnico y condiciones laborales, el escenario 3A se posiciona como una alternativa altamente eficiente sin necesidad de modificar la infraestructura

actual. Esta característica lo convierte en una opción de implementación inmediata en contextos municipales donde no sea viable, por el momento, el rediseño estructural requerido por el bidón metálico.

Tabla 4.6. Matriz comparativa de escenarios operativos

Criterio	Escenario 1A	Escenario 1B	Escenario 2A	Escenario 2B	Escenario 3A	Escenario 3B
Total, horas/año	1105	798	1049	742	663	531
Tipo de mezcla	Manual	Manual	Manual	Manual	Mecánica	Mecánica
Transvases por ciclo	2	2	1	1	0	0
Reducción esfuerzo físico	Nula	Parcial	Parcial	Parcial	Alta	Muy alta
Requiere rediseño del compostador	No	No	No	No	No	Sí (bidón metálico)
Riesgos ergonómicos	Altos	Medios	Medios	Medios	Bajos	Mínimos
Distribución equilibrada de tareas	Baja	Media	Media	Media	Alta	Muy alta
Viabilidad de implementación inmediata	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Media
Eficiencia operativa global	Baja	Media	Media	Media	Alta	Muy alta

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3. Comparación de riesgos ergonómicos

En estos escenarios persisten los riesgos ergonómicos señalados en la Tabla 4.7, particularmente asociados a la aireación manual de la materia orgánica. Esta actividad implica un esfuerzo físico considerable, ya que requiere el uso intensivo de la espalda y los brazos en posturas forzadas o no ergonómicas, combinadas con la manipulación de cargas pesadas, propias del elevado contenido de humedad de la materia orgánica. Además, durante la operación se presentan movimientos repetitivos de torsión e inclinación del tronco, lo cual incrementa el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y fatiga física acumulada en los operarios.

La siguiente Tabla resume los principales factores de riesgo ergonómico identificados en los diferentes tipos de operación evaluados en el sistema de compostaje comunitario descentralizado. Se observa una evolución positiva en la reducción de estos riesgos conforme se avanza hacia modalidades semimecanizadas y mecanizadas.

Tabla 4.7. Comparativa de riesgos ergonómicos por tipo de operación en SDC

Tipo de riesgo ergonómico	Operación manual (1A/1B)	Operación semimecánica (2A/2B)	Operación mecanizada (3A/3B)
Giros del tronco (30°–90°)	Presente	Presente	Eliminado
Frecuencia de manipulación (>1 vez/min)	Presente	Reducido	Eliminado
Inclinación del tronco prolongada	Presente	Presente	Eliminado
Condiciones térmicas extremas	Presente	Reducido	Reducido
Carga de peso manual (>25 kg)	Presente	Reducido	Eliminado

Elaboración propia a partir de (Ministerio de trabajo y economía social 2024)

4.1.2.4. Comparación de limitaciones técnicas

La Tabla 4.8 resume las principales limitaciones técnicas identificadas en cada uno de los escenarios evaluados durante la implementación del sistema de compostaje comunitario descentralizado (SCD). Estas limitaciones, observadas en campo, tienen implicaciones directas sobre la eficiencia operativa, el esfuerzo físico requerido y la viabilidad del modelo a largo plazo.

Tabla 4.8. Limitaciones técnicas por escenario operativo

Escenario	Limitación detectada	Implicación operativa
1A	Alta carga física por aireación y doble transvase. Operación 100 % manual.	Elevado tiempo por actividad. Riesgos ergonómicos. Baja escalabilidad.
1B	Misma carga física que 1A, aunque con menor frecuencia semanal.	Menor tiempo total, pero persisten riesgos y baja eficiencia.
2A	Reducción parcial del esfuerzo, pero dificultad para aireación con big bags dentro.	Aireación limitada, riesgo de compactación y baja homogeneización del material.
2B	Igual que 2A. Menor carga horaria total, pero persistencia de esfuerzo en aireación.	Mejora horaria, pero aireación deficiente. Se mantiene necesidad de intervención manual.
3A	Presencia de puntos muertos en el mezclado mecánico. Desgaste estructural del compostador. Dependencia tecnológica del sistema mecanizado. Costos de inversión inicial.	Requiere intervención manual puntual. Necesidad de mantenimiento preventivo y capacitación técnica del personal. Alta inversión inicial compensada por reducción de OPEX.
3B	Reducción de capacidad útil del compostador por volumen ocupado por bidón metálico.	Necesidad de rediseñar el compostador para no comprometer capacidad de tratamiento.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de trabajo y economía social (2024)

4.1.2.5. Escenario seleccionado y justificación

La Figura 4. 23 muestra la comparación de los cuatro escenarios operativos (1A, 2B, 3A y 3B) en función de cinco criterios cualitativos codificados como A–E. Se utilizó un gráfico tipo radar para visualizar el comportamiento relativo de cada escenario.

- Escenario 3B (color rojo ladrillo) presenta el mejor desempeño global, con valores muy altos en todos los criterios evaluados, destacando especialmente en la reducción del esfuerzo físico (A), los riesgos ergonómicos (E) y la eficiencia operativa global (B). Este escenario representa la configuración más balanceada y eficiente, aunque podría tener mayores requerimientos para su implementación inmediata (C).
- Escenario 3A (salmo cálido) muestra un buen comportamiento general, aunque ligeramente inferior a 3B. Presenta valores altos en casi todos los criterios, su puntuación en viabilidad de implementación inmediata (C) es media, teniendo en cuenta que es el modelo que actualmente está operando,

aunque requiere una inversión inicial para realizar las adaptaciones de la mezcladora en el camión.

- Escenario 2B (mostaza) se ubica en un rango medio de desempeño. Aunque mejora significativamente respecto a 1A, su impacto positivo en criterios como eficiencia (B) y ergonomía (E) es limitado, lo cual indica que aún representa una carga operativa considerable para el personal.
- Escenario 1A (verde oliva) evidencia el menor rendimiento general, especialmente en los criterios A (reducción del esfuerzo físico), B (eficiencia) y E (ergonomía), posicionándose como el escenario más exigente físicamente y con menor eficiencia técnica. Su único punto favorable relativo es la viabilidad de implementación inmediata (C), dado que requiere menos recursos o modificaciones para su puesta en marcha.

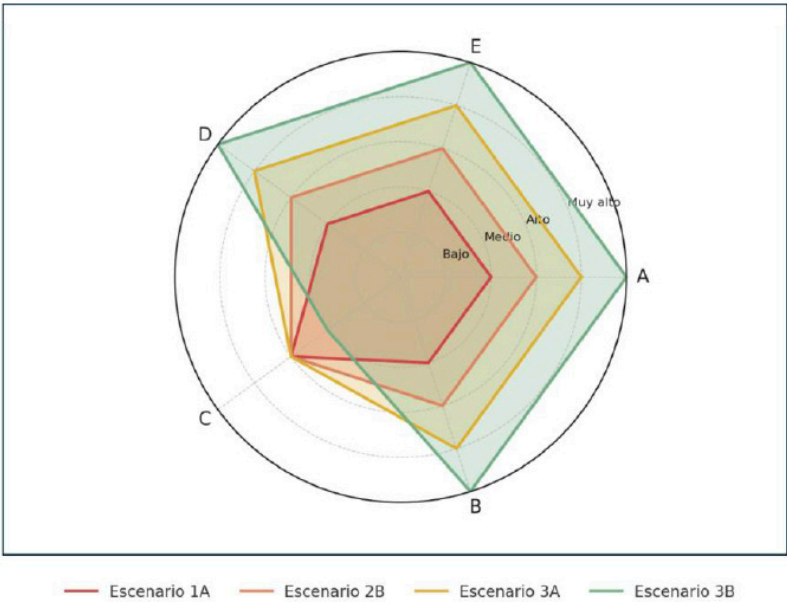


Figura 4.23. Comparación de escenarios según criterios cualitativos. A: Reducción del esfuerzo físico, B: Eficiencia operativa global, C: Viabilidad de implementación inmediata, D: Distribución equilibrada de tareas, E: Riesgos ergonómicos. Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, y considerando tanto las condiciones actuales del sistema como los criterios de sostenibilidad a largo plazo, el escenario 3A es seleccionado como el más adecuado para ser replicado en el contexto de esta investigación, constituyendo una opción de alta eficiencia técnica y baja complejidad de implementación.

El análisis integral de los escenarios operativos, sustentado tanto en los datos cuantitativos como cualitativos, permite concluir que los escenarios 3A y 3B, ambos mecanizados, representan las opciones más viables desde el punto de vista técnico-operativo para la consolidación de un sistema de compostaje comunitario profesionalizado y sostenible.

Desde una perspectiva técnica, estos escenarios permiten una reducción significativa en las horas de trabajo anuales, especialmente en las actividades de mayor carga física como la aireación y los transvases. Esto se traduce en una disminución sustancial del esfuerzo físico requerido, lo que a su vez contribuye a la prevención de lesiones laborales y ausencias que podrían afectar la continuidad del servicio. Esta ventaja no solo tiene implicaciones ergonómicas, sino también económicas, ya que impacta directamente en la planificación de recursos y en la reducción del OPEX, como se abordará en la sección económica.

En términos de sostenibilidad, escalabilidad y viabilidad institucional, el escenario 3A se destaca como la opción más sólida para ser implementada a corto plazo. Actualmente se encuentra en funcionamiento en el municipio de LMR, lo que ha permitido mantener la operatividad del sistema y demostrar su viabilidad en condiciones reales. Su implementación no requiere modificaciones estructurales, lo que facilita su replicabilidad en otros municipios con características similares, tanto en términos logísticos como presupuestarios.

Por otro lado, el escenario 3B representa la versión más optimizada del sistema, al incorporar un diseño circular metálico que mejora la aireación y descarga del compost, minimizando los puntos muertos y maximizando la eficiencia operativa. Sin embargo, este modelo aún se encuentra en fase experimental, y su implementación requeriría el rediseño completo de la infraestructura de los compostadores. Aunque los resultados técnicos son prometedores, su viabilidad depende de factores económicos y logísticos que escapan al alcance de esta fase del estudio.

4.1.3. Área de postprocesamiento

Transcurrido un período de entre 90 y 120 días, el material es trasladado al área de post-procesamiento, cuya infraestructura y equipamiento fueron detallados

en el Capítulo 3. Esta fase se realiza con equipos completamente eléctricos, cuyos consumos específicos se presentan en la Tabla 4.9. En cuanto a la frecuencia operativa, el tamizado se lleva a cabo una vez por semana, con una duración estimada de entre 30 minutos y una hora, dependiendo del volumen de material a procesar.

Tabla 4.9. Consumo eléctrico por equipo área de post-procesamiento

Item	Potencia (Kw)	horas de consumo al mes	Consumo kwh/ mes	Consumo kwh/ año
Tromel	1.1	4	4.4	52.8
Cinta transportadora	0.75	4	3	36
Polipasto	0.2	4	0.8	9.6
Total, mes			8.2	
Total, año				98.4

Fuente elaboración propia a partir de (Talleres Salo 2021)

4.1.4. Balance de masa y materia

Entradas: materia orgánica, estructurante, agua y oxígeno: A continuación, se describe el funcionamiento del proceso de compostaje comunitario en el municipio de LMR, integrando los flujos de entrada y salida del sistema. A continuación, se detalla el contenido y comportamiento de cada uno de estos componentes.

Entradas de materia orgánica y estructurante: La presente sección analiza los datos recopilados durante la operación de los compostadores, incluyendo el número y peso de las bolsas de fracción orgánica, el uso del agente estructurante y los movimientos asociados a los transvases. Durante los años de operación, los compostadores han recibido una media anual de 16.472 bolsas de residuos orgánicos. El mayor volumen de aportación se registró en el mes de marzo, con un total de 1.542 bolsas, mientras que el valor más bajo se presentó en diciembre, con 1.130 bolsas, seguido muy de cerca por febrero con 1.132 bolsas. Esta variabilidad mensual representa una fluctuación del 26,6 % entre el mes de mayor y menor aportación.

En términos generales, el promedio mensual de aportaciones se sitúa en torno a las 1.479 bolsas, (Figura 4.24) lo que permite establecer un patrón de comportamiento que será útil para la planificación operativa, logística y estacional del sistema.

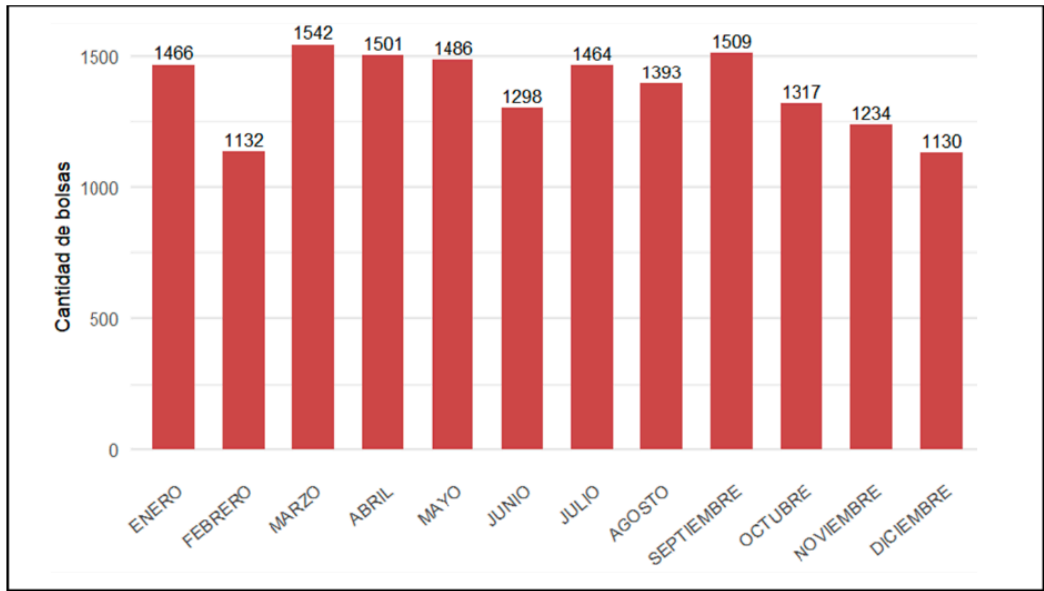


Figura 4.24. Número de bolsas promedio por mes. Fuente: Elaboración propia

La materia orgánica generada en LMR es ingresada por cada uno de los usuarios en bolsas compostables, las cuales son abiertas por el personal a cargo de la operación, contabilizadas y registradas en un formato. Es de resaltar que esta aportación ha sido pesada mediante bascula, lo que ha permitido conocer la generación de orgánica exacta en tn, correspondiente a 90 t/año. Una vez abiertas las bolsas de orgánica, estas son mezcladas con la materia orgánica existente en el compostador y estructurante. En lo que se refiere al comportamiento de la materia orgánica mensual. La Figura 4.25, muestra la aportación mensual por compostador. Se puede observar que el punto llamado 1r Codol, es el que mayor aportación recibe (2256 bolsas durante todo el año) y durante el mes de septiembre recibió mayor cantidad de bolsas (235), en segundo lugar se observa el punto Casas con 1896 bolsas en total, resaltando el mes de marzo como el que mayor aportación recibió (182), en tercer lugar de aportación se encuentra el punto primer con 1818 bolsas en total, siendo el mes de enero el que presentó mayor aportación con 186 bolsas y por último se observa el punto Parque con 1699 bolsas, siendo el mes de septiembre el que recibió mayor aportación (181).

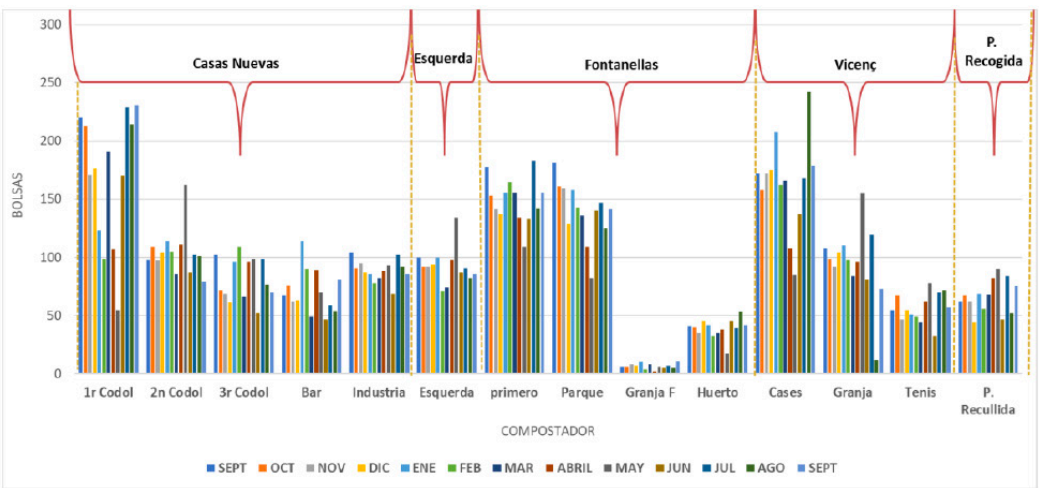


Figura 4.25. Comportamiento aportación por áreas de compostaje y Barrios. Fuente: Elaboración propia

Peso de las Bolsas: En general las características de las bolsas de fracción orgánica que los usuarios aportan a los compostadores de LMR son grandes, con un peso aproximado entre 5 y 5,5 kg cada una.

Como resultado de multiplicar este valor por el número de bolsas (16.472), se obtiene que durante estos doce meses de operación se han gestionado en los compostadores, entre 82.300 kg y 90.596 kg de fracción orgánica (82.3 y 90.6 Tn). La materia orgánica de LMR principalmente está compuesta por vegetales, frutas, residuos de comida y residuos de poda (Figura 4.26).

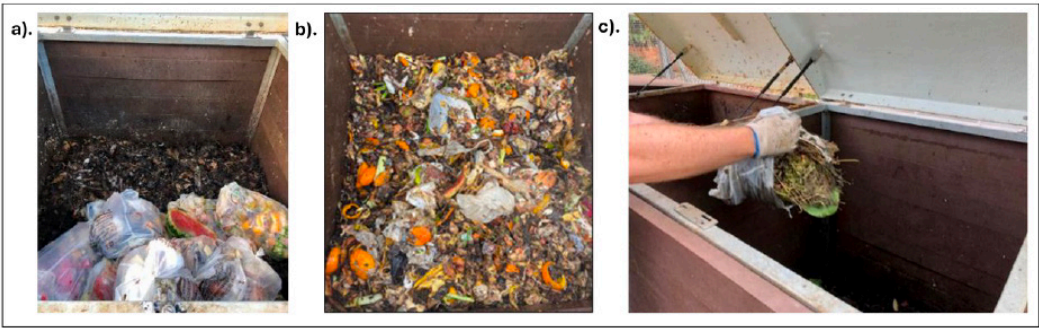


Figura 4.26. Recepción y caracterización inicial de la FORM en el módulo de aportación.

(a) Bolsas con biorresiduos depositadas directamente en el módulo de aportación, sin separación previa. (b) Contenido de las bolsas tras su vaciado, donde se observa una mezcla de residuos alimentarios (c) residuos de poda y jardinería en volumen apropiado para el compostador

Fuente: Elaboración propia

Presencia de residuos impropios: En relación con los residuos impropios, su detección y retiro se realizaban de forma manual al momento de abrir las bolsas de materia orgánica durante el proceso de aportación. Es importante destacar que la presencia de estos elementos fue mínima, representando menos del 0.5 % del total de bolsas abiertas anualmente.

Los impropios más frecuentes correspondieron a envoltorios de alimentos, como plásticos flexibles, y en menor medida, a cápsulas de café. La baja incidencia de estos materiales contaminantes sugiere un adecuado nivel de separación en origen por parte de la comunidad participante, aspecto clave para la calidad del compost final y la eficiencia del proceso. La Figura 4.27 muestra residuos alimentarios introducidos en los compostadores comunitarios sin la separación previa del envase, lo que impide su correcto tratamiento. Estos elementos se consideran impropios, ya que no son compostables y suponen una contaminación del flujo de materia orgánica, además de dificultar las labores de tamizado y tratamiento posterior.

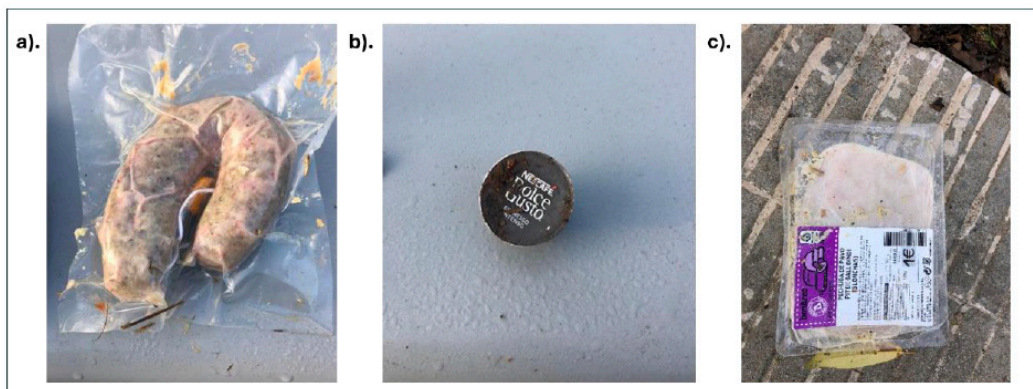


Figura 4.27. Ejemplos de impropios en el módulo de aportación: residuos orgánicos dispuestos incorrectamente. (a) Producto cárnico envasado al vacío. (b) Cápsula de café monodosis de aluminio. (c) Envase plástico con restos de fiambre. *Fuente: Elaboración propia*

4.1.4.1 Factores que influyen en la aportación

Condiciones estacionales y climáticas: El análisis de los datos (Figura 4.28) muestra que las estaciones del año no introducen una variabilidad significativa en la aportación de materia orgánica, ya que el porcentaje de contribución por estación se mantiene cerca del 25 % en cada caso. Esto sugiere que las aportaciones se distribuyen de manera uniforme a lo largo del año, independientemente de las fluctuaciones estacionales

que podrían esperarse en otros contextos. Por otro lado, al analizar la variación entre barrios, se observa que la distribución relativa de las aportaciones se mantiene constante en todas las estaciones. Es decir, el barrio con mayor aportación (Casas Noves) continúa liderando en todas las estaciones, seguido por los otros barrios en un orden estable. Esto refleja un patrón consistente de generación de materia orgánica por barrio, posiblemente influenciado por factores estructurales como la población, el nivel socioeconómico y los hábitos de separación de residuos en cada zona.

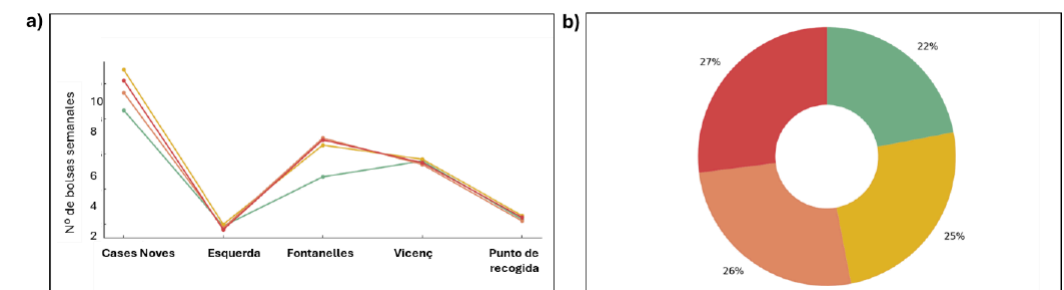


Figura 4.28. Análisis de las variaciones estacionales en los aportes de FORM por vecindario.

(a) Distribución de los aportes semanales de materia orgánica por vecindario (número de bolsas) a lo largo de las cuatro estaciones del año. (b) Porcentaje de aportes globales por estación del año. *Fuente: Elaboración propia*

La estabilidad en la aportación por estación puede indicar que las fluctuaciones típicas en la generación de residuos orgánicos, como las que podrían esperarse en verano o invierno (e.g., mayor generación por vacaciones o consumo estacional), tienen un impacto mínimo en este caso. Esto permitió una planificación operativa más consistente durante todo el año. En cuanto al patrón por barrio, la continuidad en el orden de aportaciones entre barrios refuerza la idea de que los factores estructurales, como la densidad poblacional y las características socioeconómicas, son más determinantes en la generación de residuos que las variaciones estacionales. Este comportamiento predecible puede facilitar la asignación de recursos y el diseño de frecuencias de operación ajustadas a las necesidades específicas de cada barrio.

Finalmente, en lo relacionado con la variación de temperaturas por las estaciones, está se muestra en la sección Estabilidad del compost: índice de respiración dinámica (IRD).

4.1.4.2. Análisis espacial y temporal: Aporte por barrio o zona

El análisis de las aportaciones (Figura 4.29) por barrio muestra una marcada variabilidad espacial y temporal, determinada por factores como la densidad poblacional, los hábitos de separación y el nivel de participación ciudadana. Estas diferencias motivaron la necesidad de adaptar la operación mediante el desarrollo de distintos escenarios técnicos, ajustando la frecuencia de atención y el tipo de sistema (manual o mecanizado) a las características específicas de cada zona.

En este contexto, el barrio de Cases Noves destaca por registrar el mayor volumen de aportación de materia orgánica, con un rango anual entre 40 y 45 toneladas, lo que representa el flujo más alto entre los barrios estudiados. En contraste, l'Esquerda y el Punto de recogida presentan las cifras más bajas, con aportaciones entre 5,0 y 6,0 toneladas/año, posiblemente reflejando menor densidad poblacional, menor participación o diferencias estructurales en los hábitos de consumo y generación de residuos.

Un caso intermedio es Fontanelles, que aporta entre 25 y 26 toneladas/año, indicando una alta participación, aunque inferior a la de Cases Noves. Estas diferencias tuvieron un impacto directo sobre el tiempo de operación requerido por compostador y la planificación logística, lo que justificó el establecimiento de frecuencias operativas diferenciadas por barrio, optimizando el rendimiento del sistema.

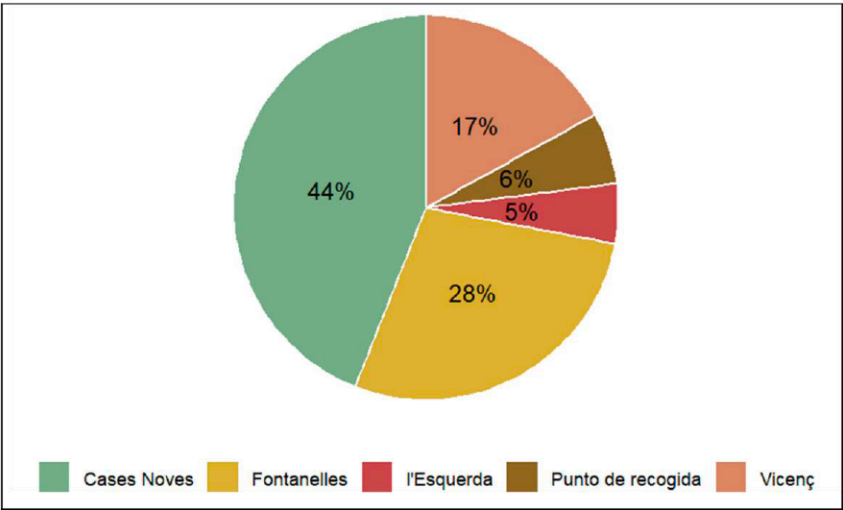


Figura 4.29. Distribución porcentual de los aportes de materia orgánica por barrio. Fuente: Elaboración propia

4.1.4.3. Factores sociales y económicos no cuantificados, pero observados

Si bien este estudio no incluyó un análisis estadístico o georreferenciado específico del nivel de renta, patrón alimentario o estrato socioeconómico de los barrios, la experiencia operativa permitió observar que estos factores influyen significativamente en la dinámica del sistema de compostaje. Por ejemplo, se identificaron relaciones no cuantificadas entre el nivel de ingresos, los hábitos alimentarios (mayor o menor generación de residuos orgánicos), y la disposición a participar en iniciativas de compostaje comunitario.

Este hallazgo sugiere que no basta con que un sistema sea técnicamente viable; también debe contar con condiciones sociales que garanticen su aceptación, participación y sostenibilidad en el tiempo. Por tanto, se recomienda que futuros estudios incluyan variables como estrato socioeconómico, distribución geográfica, patrones de consumo y cultura ambiental, ya que estos elementos pueden —y deben— ser considerados en el diseño, implementación y escalabilidad de proyectos de compostaje descentralizado.

Incorporar estos criterios no solo mejora la eficiencia operativa, sino que fortalece la viabilidad social de los sistemas, aspecto clave para garantizar su continuidad, apropiación comunitaria y alineación con políticas de economía circular inclusiva.

4.1.4.4. Origen y uso del material estructurante

Al inicio de la implementación del sistema, los residuos de poda utilizados como agente estructurante fueron proporcionados por la empresa de jardinería Tacosona Vic. Posteriormente, el abastecimiento de este material se obtuvo mediante dos fuentes complementarias:

- 1) Poda comunitaria triturada: Se empleó la poda depositada por los habitantes del municipio de LMR en un punto de acopio habilitado por el Ayuntamiento, la cual fue triturada in situ y almacenada en bigbag para su uso como estructurante.
- 2) Recirculación de estructurante: A partir del segundo ciclo operativo (transcurridos aproximadamente cuatro meses desde el inicio), se incorporó como estructurante parte del material tamizado del proceso de compostaje anterior, favoreciendo así la recirculación interna de biomasa lignocelulósica y cerrando el ciclo del material dentro del sistema.

El material estructurante fue esencial para garantizar la funcionalidad del proceso de compostaje, actuando como agente de carga con múltiples funciones: aportar porosidad al sustrato, evitar la formación de lixiviados, reducir la generación de olores, minimizar la atracción de vectores sanitarios (moscas y roedores) y facilitar una aireación adecuada. De esta manera, el estructurante cumplió también una función como absorbente higroscópico.

Proporción de mezcla y dinámica operativa: La proporción entre la Fracción Orgánica de los Residuos Municipales (FORM) y el Agente Estructurante (AE) se ajustó en función del contenido de humedad de la FORM. Este se determinó mediante la prueba de compresión manual («prueba del puño») siguiendo la metodología propuesta por el (US Department of Agriculture, 2015). Con base en estas mediciones, se establecieron mezclas con relaciones volumétricas que variaron entre 1:1 y 2:1 (FORM:AE).

Durante el periodo experimental, la proporción media alcanzada fue de 1.3:1 (FORM:AE). Esta relación permitió mantener una humedad adecuada en el sistema y asegurar las condiciones aeróbicas requeridas.

En términos operativos, la mezcla semanal promedio manejada se aproximó a 1.8 – 1.95 toneladas de FORM y 0.4 – 0.5 toneladas de AE, lo que reflejó una estabilidad en el flujo de entrada al sistema y una buena capacidad de absorción por parte del estructurante, especialmente en periodos de mayor humedad.

La Figura 4.30 (a) muestra el espacio habilitado por el ayuntamiento para la disposición de residuos de poda de gran volumen, específicamente aquellos aportes ciudadanos que superaban los 1 m³. Este punto de acopio permitía centralizar los residuos leñosos generados tanto por mantenimiento municipal como por particulares. Una vez acumulada, la poda era sometida a un proceso de trituración in situ, y el material resultante se almacenaba en big bags, siendo posteriormente utilizado como material estructurante en el proceso de compostaje comunitario descentralizado (Figura 4.30 (b)). Esta estrategia operativa facilitó el cierre del ciclo de la materia orgánica a nivel local, aprovechando un recurso disponible y reduciendo la necesidad de aprovisionamiento externo.

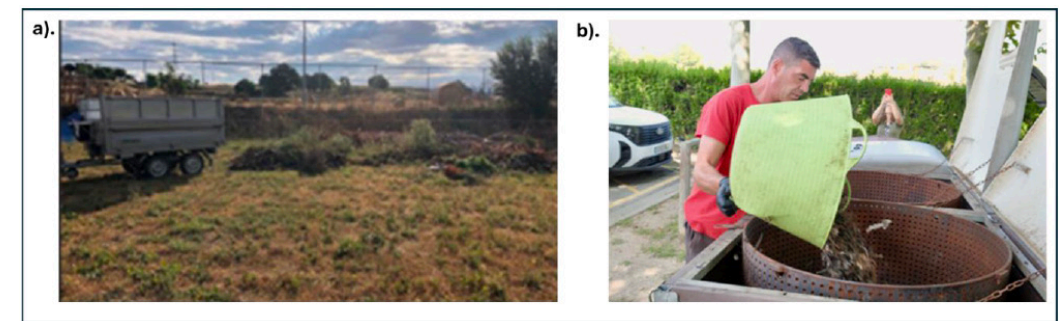


Figura 4.30. Gestión de estructurante. a) Espacio habilitado para disposición de residuos de poda., (b) aplicación del estructurante durante la operación del proceso *Fuente: Elaboración propia*

4.1.4.5. Suministro de agua durante el proceso



Figura 4.31. Suministro de agua durante el proceso. *Fuente: Elaboración propia*

El suministro de agua se realizó únicamente durante la temporada de verano (Figura 4.31), cuando se observaron condiciones de sequedad en el material en fase de maduración. Este aporte no fue periódico ni sistematizado, y por tanto no se llevaron registros cuantitativos del volumen aplicado. La decisión de añadir agua se basaba en observaciones visuales y táctiles del compost, especialmente cuando la humedad descendía por debajo del nivel óptimo, afectando el desarrollo de la actividad microbiana. Según Sánchez y Gea (2025), mantener una humedad entre 50–60 % es esencial para favorecer la descomposición aerobia, ya que niveles inferiores al 40 % pueden provocar

ralentización del proceso biológico y acumulación de material no degradado. En este caso, la adición puntual de agua permitió restablecer condiciones mínimas de humedad sin comprometer la estabilidad del proceso.

4.1.4.6. Salidas: compost, emisiones y lixiviados

El análisis del balance de masa y materia en el sistema de compostaje comunitario descentralizado (SCD) de LMR (Figura 4.32) se construyó a partir de datos empíricos

obtenidos mediante la caracterización fisicoquímica de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) y del compost final. Este enfoque permite identificar las rutas de transformación y pérdida de masa, así como evaluar la eficiencia del sistema en términos de conservación de nutrientes y materia orgánica estabilizada.

El proceso involucra entradas principales como la FORM (1 t/año), el agente estructurante (poda triturada o recirculada) y agua (adicionada según necesidad). Las salidas incluyen el compost estabilizado (300 kg/año), emisiones gaseosas (CO_2 , NH_3 , N_2O), pérdidas de humedad por evaporación, y lixiviados en cantidades no medidas, pero técnicamente esperables dada la humedad inicial de la FORM (>70 %).

Este balance se apoya en el marco conceptual propuesto por Sánchez y Gea, (2025), quienes explican que, en sistemas aerobios abiertos como el compostaje comunitario, las pérdidas por mineralización (CO_2), volatilización de nitrógeno (NH_3 , N_2O) y lixiviación son inevitables y deben considerarse en la eficiencia del proceso.

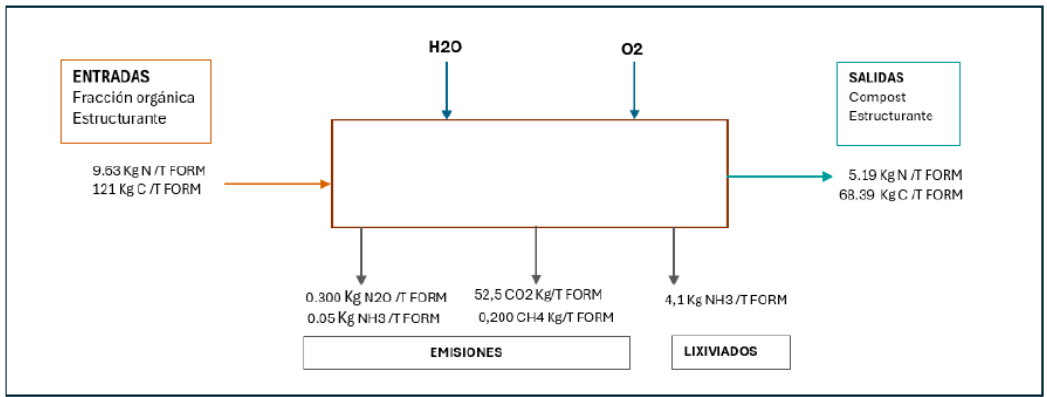


Figura 4.32. Esquema del balance de nitrógeno y carbono. Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Balance de carbono

Según la caracterización del material de entrada y salida, se estima que aproximadamente entre el 40 y 60 % del carbono presente en la FORM se pierde como CO_2 , y menos del 1 % como CH_4 . Estos resultados son coherentes con lo reportado por (Amlinger *et al.* 2008), que señalan que entre el 60–70 % del carbono se libera como CO_2 en procesos bien aireados.

4.1.6. Balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno realizado a partir de la caracterización de entrada y del compost final sugiere que aproximadamente el 54 % del nitrógeno total se conserva en el producto final como formas orgánicas estables. Solo un 3.62 % del nitrógeno se perdió en forma de emisiones gaseosas (NH_3 y N_2O), en concordancia con las condiciones aeróbicas controladas y un pH moderado del proceso (Sánchez & Gea, 2025; Amlinger *et al.*, 2008). Sin embargo, se estima que el 42 % restante del nitrógeno pudo haber sido perdido vía lixiviados, principalmente como NH_4^+ disuelto. Esta afirmación se plantea como una hipótesis técnica, ya que no se realizó una medición directa de lixiviados durante la implementación. No obstante, dicha hipótesis se apoya en la literatura científica, que indica que en condiciones de alta humedad (>70 %) y sin sistemas de drenaje controlado, las pérdidas líquidas de nitrógeno pueden alcanzar entre el 25 y el 45 % del total inicial (Sommer, 2001; Parkinson *et al.*, 2004; Ming *et al.*, 2008).

Además, como señalan Gea y Sánchez (2025), una parte del nitrógeno puede formar compuestos solubles no volátiles (como nitratos y amonio) que no se conservan en el compost final, y que pueden ser arrastrados con el agua percolada si no se dispone de barreras físicas o biofiltros. Por tanto, este resultado subraya la necesidad de incorporar monitoreo de lixiviados en futuras fases del proyecto para validar esta hipótesis y evitar pérdidas de nutrientes con implicaciones ambientales.

4.1.7. Balance hídrico

Se estima técnicamente que entre 75–100 litros por tonelada de FORM podrían haberse perdido como fracción líquida, en línea con (Ming *et al.* 2008). Esta hipótesis se refuerza por la desaparición del nitrato medido en las caracterizaciones.

4.1.8. Rendimiento y eficiencia del proceso

El sistema evaluado mostró una eficiencia de producción de compost de aproximadamente 30 % respecto a la masa de entrada, lo que se alinea con rangos esperados en compostaje de OFMSW 25–45 %, según Sánchez & Gea (2025). El

material final mostró buena estabilización, madurez y calidad para uso agrícola, confirmando una conversión eficiente de la materia orgánica, pese a las pérdidas inevitables.

4.1.9 Implicaciones técnicas y ambientales

Los resultados del balance sugieren que: (i) el sistema operó de forma funcional y estable, pese a no contar con medidas activas de captura de gases o lixiviados; (ii) para reducir pérdidas de N y mejorar la sostenibilidad del proceso, se recomienda incorporar sistemas de biofiltros y recogida de lixiviados; y (iii) monitorear el índice de respiración (DRI), junto con balances de C y N, proporciona indicadores clave de eficiencia y estabilidad.

Con el objetivo de describir y evaluar el comportamiento operativo del proceso de compostaje descentralizado en ciclos de 4 meses (~120 días), la Tabla 4.10 relaciona las fases biológicas del compostaje con sus parámetros ambientales y microbiológicos más relevantes: temperatura, pH, humedad y tipo de actividad microbiana predominante.

Esta clasificación se basa en referencias ampliamente documentadas en la literatura técnica sobre compostaje comunitario (Amlinger *et al.*, 2008; Colón *et al.*, 2010), así como en observaciones de campo realizadas durante esta investigación. Las fases incluyen desde la etapa mesófila inicial, caracterizada por temperaturas moderadas y actividad bacteriana acelerada, hasta la fase de curado, donde la temperatura se estabiliza y predomina la humificación de compuestos más recalcitrantes.

El conocimiento detallado de estos rangos permite:

- Guiar las prácticas de mezcla y aireación,
- Determinar el momento adecuado para cerrar los módulos a nuevas entradas,
- Evaluar la madurez y estabilidad del compost final,
- Identificar posibles desviaciones operativas (por exceso de humedad, falta de estructurante o ventilación insuficiente).

La Tabla 4.10 presenta este modelo de evolución térmica, pH y humedad que permitió interpretar los resultados obtenidos y validar técnicamente los tiempos de ciclo definidos para el sistema evaluado.

Tabla 4.10. Modelo de evolución térmica, pH y humedad

Fase	Rango de días	Rango de Temperatura	Rango de pH	Rango de Humedad (%)	Observaciones operativas
Mesófila inicial	Día 0-2	28-38	5.5-7.5	55-65	Controlar humedad y homogeneidad inicial con estructurante y suficiente aireación
Termófila activa	Día 3-15	55-62	6.5-8.5	50-60	Monitoreo de temperatura, prevenir exceso de humedad con aportación de estructurante
Termófila con fluctuaciones	Día 16-30	50-59	7.0-8.5	50-60	Reactivación mediante aireación, se debe controlar oxigenación
Transición y estabilización	Día 31-60	40-47	7.5-8.5	50-55	Inicia el declive térmico, evitar compactación. Se realiza transvase en caso de ser manual o se cierra el compostador en caso de que fuera el de aportación
Maduración	61-100	32-40	7.5-8.5	45-55	Mantener ventilación en caso de que lo requiera o aportar agua en caso de que se encuentre demasiado seco y sea verano
Final (curado)	Día 101-120	25-32	7.0-8.0	40-50	Listo para postprocesamiento, tamizado y almacenamiento

Elaboración propia a partir de United states department of agriculture and the United States Composting Council (2001)

El análisis de la evolución térmica y del pH durante el proceso de compostaje permitió caracterizar las diferentes fases biológicas del sistema, identificando patrones coherentes con procesos aeróbicos controlados. Sin embargo, alcanzar y mantener condiciones óptimas de temperatura, oxigenación y pH no depende únicamente de la composición inicial de los materiales, sino también de las prácticas operativas aplicadas durante el ciclo, entre las cuales los trasvases juegan un papel central.

Transvases: Aunque el sistema estudiado incluía rutinas de mezcla o volteo manual diario, los trasvases (en los escenarios manuales) ofrecieron una intervención más profunda en la masa, permitiendo corregir gradientes de temperatura, reducir zonas compactadas o húmedas y renovar la distribución de oxígeno previniendo condiciones anaeróbicas.

La frecuencia, el momento y la técnica de trasvase influyen directamente en la evolución del proceso, afectando tanto la duración del ciclo como la calidad del compost final. Por esta razón, se analizó la distribución y cantidad de trasvases realizados en los distintos puntos del sistema a lo largo del año (Tabla 4. 11), con el fin de identificar patrones de manejo, posibles asimetrías operativas y su relación con la estabilidad y madurez del producto obtenido.

A continuación, se analiza su frecuencia, distribución por puntos de compostaje y su implicación sobre la duración de los ciclos y la estabilidad del proceso.

Tabla 4.11. Tiempo de retención por compostador

BARRIO	PUNTOS	Nº DE COMPOSTADORES	CANTIDAD DE TRASVASES EN EL AÑO	Semanas promedio (Proceso de compostaje)																										
				Mes 1			Mes 2			Mes 3			Mes 4			Mes 5			Mes 6											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Fontanelles	Primer	5	27																											
	Granja	1	1																											
	Hort	3	6																											
	Parc	5	25																											
Esquerda	Esquerda	3	25																											
	1r Codol	5	24																											
C. Noves	2n Codol	5	17																											
	3r Codol	3	10																											
	Industria	3	24																											
	Bar	3	15																											
Vicentç	Tenis	6	21																											
	Cases	3	24																											
	Granja	3	22																											
P. Recullida		10	15																											

Fuente: Elaboración propia

Algunos aspectos identificados en la periodicidad de los trasvases son se relacionan en la siguiente Tabla

Tabla 4.12. Aspectos identificados en los trasvases

Alta variabilidad en la frecuencia de trasvases	Algunos puntos como Fontanelles – Primer y C. Noves – 1r Codol alcanzaron hasta 18–19 trasvases/año, indicando una alta rotación y dinamismo en el manejo del compost.
	En cambio, puntos como Fontanelles, Granja-Vicenç, Vicenç -Tennis muestran 1 o 9 trasvases, lo que sugiere una operativa más pasiva o con menos aportaciones semanales.
Duración media del proceso constante (~4 meses):	La mayoría de los módulos permanecieron activos entre 16 y 18 semanas, lo cual coincide con los ciclos de 4 meses observados y validados en campo. Esta estabilidad en la duración, a pesar de la variabilidad en los trasvases, indica que la maduración del compost se alcanzó de forma bastante uniforme gracias al control de aireación (diaria + trasvases) y al equilibrio de humedad
Relación entre trasvases y dinámica de entrada:	Puntos con más trasvases recibieron mayor carga de FORM, lo que justifica una gestión más activa para evitar compactación y sobrecalentamientos.
	En puntos con menos trasvases, el proceso dependió más de la aireación por mezcla manual y de periodos de reposo más prolongados.

Fuente: Elaboración propia

Monitoreo de oxígeno: La Figura 4.33 muestra el sistema empleado para la medición del oxígeno en el interior del compostador durante el proceso de biodegradación. La sonda introducida en la fracción orgánica permite la extracción del gas contenido en la masa mediante la succión generada por una bomba conectada al sensor de oxígeno. Este sensor registra en tiempo real el porcentaje de oxígeno presente en la FORM, siendo habitual la obtención de valores entre 16 % y 18 %, lo cual indica condiciones aeróbicas adecuadas para el proceso de compostaje (Puyuelo *et al.* 2010). Además, se incorporaron dos matraces Erlenmeyer como trampas de agua, con el fin de retener la humedad contenida en el gas antes de que este alcanzara el sensor, protegiendo así el equipo de posibles condensaciones. Este método permitió una monitorización no invasiva y precisa de las condiciones aeróbicas del proceso.



Figura 4.33. Método empleado para monitorizar el oxígeno en el sistema de compostaje.
Fuente: elaboración propia

4.1.10. Calidad del compost obtenido

Parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos: Se analizaron muestras de compost final correspondientes a seis escenarios diferentes. La Tabla 4.13 muestra los valores promedio obtenidos para las principales propiedades fisicoquímicas. El contenido de materia orgánica fue del 61 % en promedio, un valor elevado atribuible a la naturaleza de los materiales utilizados, tal como también se ha observado en otros estudios de compostaje de FORM (Alves *et al.*, 2024). Aunque este valor supera el límite que establece el Real Decreto 529/2023 por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, se encuentra dentro del rango reportado en otros trabajos similares (por ejemplo, modelo de flujo vertical (VF): 63.3 %, modelo de flujo horizontal: (HF): 76.8 %, promedio general: 65 %).

El pH de las muestras finales osciló entre 7 y 8, y la relación C/N se situó en torno a 10 (±2), lo cual indica que el compost se encontraba en un estado adecuado de madurez. Estos valores también reflejan una buena conservación del nitrógeno durante el proceso. De hecho, el contenido de nitrógeno total fue elevado (3.1 ± 0.8 %), lo que sugiere que el producto final tiene un buen valor agronómico.

En relación con los metales pesados, todos los compost analizados cumplieron con los criterios de Clase A establecidos por la normativa española, con la excepción de

un caso puntual en el escenario 3, donde el contenido de zinc superó ligeramente el límite permitido (<300 mg/kg de materia seca). Esta desviación podría explicarse por una posible transferencia de zinc desde el cilindro o el agitador durante la operación, lo que subraya la necesidad de evaluar cuidadosamente los materiales en contacto con la fracción orgánica. Para un eventual diseño de segunda generación, sería recomendable revisar con detalle la selección de materiales y recubrimientos con el fin de evitar aportes metálicos indeseados al producto final. Adicionalmente, tal como señalan Alves *et al.* (2024) y Torrijos *et al.* (2021), este tipo de desviaciones también puede estar asociado a contaminaciones puntuales, derivadas del uso de herramientas, de errores en la separación en origen o de la presencia de materiales estructurantes contaminados. Desde el punto de vista sanitario, las muestras analizadas no presentaron presencia de Salmonella, y los coliformes fecales fueron inferiores a 10 ufc/g, cumpliendo con los requisitos de higienización para compost de alta calidad (Clase A). En conjunto, los resultados permiten afirmar que el compost obtenido es apto para su uso agrícola y cumple con las exigencias del Real Decreto 529/2023, así como con los criterios establecidos por la normativa europea para agricultura ecológica.

En la Tabla 4.13 Propiedades fisicoquímicas del compost obtenido en LMR. Se presentan el valor medio y la desviación estándar para cada parámetro. También se muestran los límites de calidad del compost establecidos por la legislación española.

Tabla 4.13. Propiedades fisicoquímicas del compost obtenido en LMR

PARAMETROS	PROMEDIO	DV	CALIDAD DEL COMPOST
Humedad* (% wb)	33	4	40 % ^c
Materia orgánica (%db)	61	6	35 % ^c
pH	8	0.04	6.0-8.5 ^a
parámetros biológicos			
Índex respirométrico (mg O ₂ g ⁻¹ SV h ⁻¹)	1.6	0.61	0.50-1. 5 ^a
parámetros químicos			
C/N	10	2.05	< 20 ^c
Nitrógeno (N) %	3.1	0.8	3.58 ± 0.64 ^b
Cadmio (Cd) **	0.6	0.09	Clase A ^c : 0.7
Cobre (Cu)**	36.7	4.7	Clase A ^c : 70
Cromo (Cr) **	< 10	N. A	Clase A ^c : 70
Mercurio (Hg)**	< 4	N. A	Clase A ^c : 1.5
Níquel (Ni)**	< 5	N. A	Clase A ^c : 25
Plomo (Pb)**	< 10	N. A	Clase A ^c : 45
Zinc (Zn)	277	72.17	Clase B ^c : 500
parámetros microbiológicos			
Salmonella*** (presencia/ausencia en 25 g)	nd	N. A	Nd ^c
Escherichia Coli (CFU/g)	< 10	N. A	< 10 ^c

Fuente elaboración propia a partir de Consejo de Compostaje de EE. UU., (2015); Vázquez et al. (2020); Vázquez y Soto (2017); Real Decreto 529 (Boe, 2013)

* %wb: base húmeda; base seca- **miligramos por kilogramo de peso seco: mg/kg p.s.-***nd: No detectado.

a. Según el Consejo de Calidad del Compost de California (Consejo de Compostaje de EE. UU., 2015)

b (Vázquez et al., 2020; Vázquez y Soto, 2017)

c Real Decreto 529 (Boe, 2023)

La Figura 4.34 muestra el compost obtenido en el SCD implementado en LMR.



Figura 4.34. Muestra de compost obtenido del SCD de LMR. Fuente: Elaboración propia

Estabilidad y madurez (IRD): La Figura 4. 35 muestra los valores del índice de respiración dinámica (IRD) obtenidos en las muestras de compost final, los cuales se sitúan en un rango de 0.5 a 2.5 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$, con una concentración mayoritaria entre 0.8 y 1.5 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$ y un valor pico alrededor de 1.0 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$. Este valor coincide con el umbral de estabilidad definido por la Unión Europea para compost de calidad, lo cual indica que la mayoría de las muestras cumplen —o están muy cerca de cumplir— con los criterios técnicos de estabilización. Además, la baja frecuencia de valores DRI elevados sugiere una proporción menor de muestras inestables, aunque también señala que algunos casos podrían requerir ajustes puntuales en el proceso (por ejemplo, en tiempo de maduración o mezclas).

Para entender mejor cómo las condiciones del proceso afectan esta variable, se aplicó un análisis estadístico ANOVA de dos vías, evaluando el efecto de dos factores principales: el tiempo de retención y las temperaturas ambientales, clasificadas en dos grupos: estaciones frías (otoño-invierno) y cálidas (primavera-verano). Los resultados mostraron que la interacción entre estos dos factores tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre el IRD ($p = 0.019$; $p < 0.05$). Esto significa que, aunque cada variable por separado no tuvo un impacto claro, su combinación sí influye de manera directa en la estabilidad del compost.

Este resultado respalda la elección de un análisis de dos factores (two-way ANOVA), ya que permite detectar efectos conjuntos no evidentes en análisis univariados, y aporta información útil para optimizar la planificación de los ciclos de compostaje según las condiciones climáticas externas.

Los resultados obtenidos refuerzan la idea de que tanto las temperaturas externas como el tiempo de retención son factores clave que influyen directamente en la calidad del compost. Para replicar este modelo con condiciones similares, es fundamental mantener un tiempo de retención cercano a los cuatro meses por ciclo, además de realizar un seguimiento cuidadoso de las temperaturas ambientales, ya que estas tienen un impacto significativo en la variabilidad del Índice de Respiración Dinámica (IRD). De forma específica, los datos muestran que tiempos de retención más largos y condiciones cálidas (primavera-verano) están asociados a una mejor estabilización del compost.

Adicionalmente, se realizó un segundo análisis estadístico tipo ANOVA de un solo factor, considerando como variable el tipo de operación de mezcla (manual vs. mecanizada). Aunque el valor p obtenido fue 0.07, lo que no indica significancia estadística estricta, sí sugiere una tendencia relevante entre el tipo de operación y los valores de IRD. Para explorar esta relación, se generó un diagrama de caja (Figura 4. 35 (b)) que compara ambos enfoques de manejo.

En la Figura 4.35 se observa que los sistemas con mezcla mecanizada (dos veces por semana) presentan valores de IRD concentrados entre 0.8 y 1.5 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$, con una mediana de 1.2 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$ y baja dispersión, lo cual indica una mayor uniformidad y consistencia en la estabilidad del compost. Por el contrario, en la operación manual (tres mezclas por semana) se evidenció una mayor variabilidad (rango de 0.7 a 2.2 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$) y una mediana superior (1.6 $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$), probablemente asociada a una menor homogeneidad en la mezcla. Estos resultados sugieren que la mecanización favorece la uniformidad del proceso, especialmente en sistemas con tiempos de retención cortos o alta carga de entrada. En comparación con sistemas de compostaje centralizado (SCC), el modelo descentralizado evaluado (SCD) mostró valores de estabilidad en un rango cercano a los descritos por Barrena Gómez *et al.* (2006), quienes reportaron medias de $1.9 \pm 0.34 \text{ mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$ en instalaciones centralizadas. Si bien los valores medianos de la operación mecanizada

(1.2 mg O₂·g⁻¹ VS·h⁻¹) se sitúan ligeramente por encima del umbral internacional de estabilidad (IRD ≤ 1.0 mg O₂·g⁻¹ VS·h⁻¹), se encuentran próximos a dicho estándar y con menor dispersión que los sistemas manuales, lo que refuerza la fiabilidad del modelo descentralizado para la obtención de compost maduro y apto para uso agrícola. (Figura 4. 35 (a)). En cuanto a la productividad del sistema, se mantuvo constante en todos los escenarios analizados, con una media de 27 toneladas de compost por año, lo que representa un rendimiento aproximado del 30 % respecto al total de materia orgánica tratada. Este dato confirma la viabilidad técnica del modelo, tanto en términos de calidad como de volumen de producción.

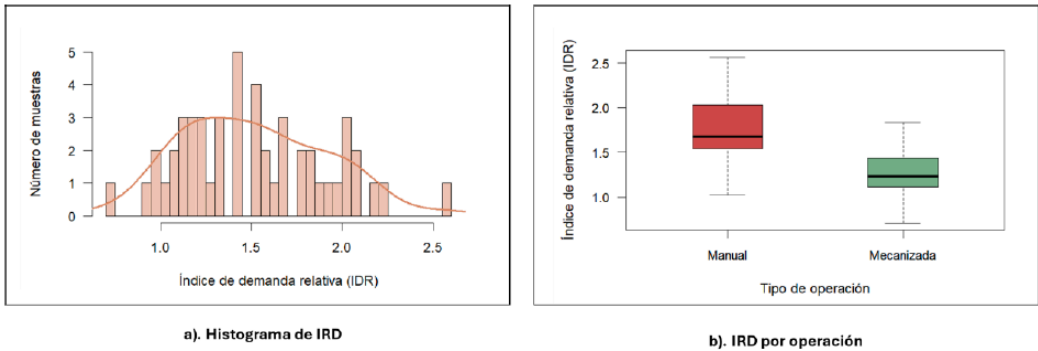


Figura 4.35. IRD análisis. (a). Distribución IRD (b). IRD por operación. Fuente: Elaboración propia

Análisis comparativo de los parámetros fisicoquímicos del compost: sistema Descentralizado vs. Centralizado La Tabla 4.14 presenta la comparación entre los resultados del compost generado en el sistema descentralizado (SCD) implementado en esta investigación y un sistema centralizado de compostaje (SCC), considerando parámetros clave de calidad agronómica y ambiental.

En términos generales, el compost del sistema descentralizado muestra mejores resultados o valores comparables en casi todos los indicadores analizados, lo que refuerza su viabilidad como alternativa técnica eficiente.

Tabla 4.14. Comparación entre los resultados del compost generado en el (SCD) implementado en esta investigación y un (SCC)

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS DE COMPOST SCD	RESULTADOS DE COMPOST SCC ¹
Materia seca	%	73.7	75.4
Materia orgánica	% sms	62	52.9
pH		8	7.7
C/N		10	11.3
Nitrogeno total (N)	% sms	3.5	2.8
Fósforo (P2O5)	% sms	1.3	2
Potasio (K2O)	% sms	2.2	2
Cadmio (Cd)	mg/Kg sms	0.6	0.9
Cobre (Cu)	mg/Kg sms	34.3	92.7
Cromo (Cr)	mg/Kg sms	< 10	18.5
Niquel (Ni)	mg/Kg sms	<5	11.9
Plomo (Pb)	mg/Kg sms	<5	27.7
Zinc (Zn)	mg/Kg sms	235	221.5
Mercurio (Hg)	mg/Kg sms	<0.4	0.4

Fuente: Elaboración propia a partir de Agencia de Residuos de Cataluña 2024

¹ Presentación ICAW 2024. El compostaje en Catalunya, materias primas y producción

Parámetros agronómicos

- Materia orgánica: El compost SCD presentó un valor del 62 % s.m.s., superior al 52.9 % del SCC, lo que indica mayor contenido de sustancias húmicas y valor fertilizante.
- pH y relación C/N: Ambos compost muestran valores dentro del rango óptimo, aunque el SCD presenta un pH ligeramente más alto (8.0) y una mejor relación C/N (10) frente a 11.3 del SCC, indicando mayor grado de estabilización.
- Nutrientes: El compost descentralizado contiene más nitrógeno total (3.5 % s.m.s.) que el SCC (2.8 %), lo cual mejora su valor fertilizante. Aunque el SCC tiene más fósforo (2 % vs. 1.3 %), los niveles de potasio son equivalentes (2.2 % vs. 2.0 %).

Contaminantes (metales pesados) El compost SCD presenta niveles significativamente más bajos de metales pesados, lo cual es especialmente importante para su uso seguro en agricultura:

- Cobre (Cu): 34.3 mg/kg en SCD vs. 92.7 mg/kg en SCC
- Cromo (Cr), Níquel (Ni), Plomo (Pb): Todos < límites detectables o muy inferiores en SCD
- Zinc (Zn): Levemente superior en SCD (235 vs. 221.5 mg/kg), aunque ambos dentro de rangos admisibles
- Mercurio (Hg): Igual o inferior en SCD (<0.4 mg/kg)

Esto sugiere una mejor separación en origen, menor contaminación de materiales estructurantes y mayor cuidado en la manipulación en el sistema descentralizado.

El análisis comparativo evidencia que el compost generado en el sistema descentralizado no solo es competitivo, sino que en varios parámetros supera al compost centralizado. Presenta mayor contenido de materia orgánica y nitrógeno, mejor relación C/N y niveles considerablemente más bajos de metales pesados, todo lo cual respalda su uso agronómico seguro y eficiente. Estos resultados refuerzan el potencial del modelo descentralizado como una estrategia viable para la gestión local de biorresiduos con criterios de calidad ambiental y circularidad.

4.1.11. Prototipo propuesto compostador optimizado

El nuevo prototipo de compostador propuesto ha sido diseñado considerando criterios de durabilidad, operatividad y adaptabilidad a los procesos de recolección y maduración descentralizada de la FORM en entornos urbanos y periurbanos. Este modelo ha sido pensado para la optimización y su uso intensivo en sistemas logísticos mecanizados, incorporando soluciones técnicas que facilitan tanto la operación diaria como el mantenimiento y control ambiental del sistema. Es de resaltar que este prototipo no existe aún y lo aquí descrito es solo una propuesta ya que su funcionamiento y diseño definitivo estaría bajo evaluación nos solamente técnica sino desde el punto de vista sostenible.

Diseño y materiales: El cuerpo principal del compostador estaría fabricado en plástico reciclado de alta resistencia, u otro material resistente seleccionado por su durabilidad

frente a la abrasión generada por el sinfín mezclador instalado en la grúa hidráulica, así como por su comportamiento estructural frente a condiciones climáticas variables. El diseño cilíndrico vertical permite una distribución homogénea del material durante el proceso de maduración.

Operación: carga, mezcla y descarga: En la parte superior, el compostador cuenta con una tapa tipo sobre, permitiendo la introducción de las bolsas de biorresiduos y otra abatible para cuestiones operativas en caso de que se requiera. Esta tapa está equipada con un gancho superior, compatible con sistemas de izado mecánico, lo que facilita su elevación y manipulación mediante grúa hidráulica, optimizando la operación de vaciado y mantenimiento.

Control ambiental: aireación, lixiviados y biofiltro: La parte inferior del prototipo integra un mecanismo de compuerta con apertura vertical, que permite la descarga controlada del compost maduro directamente en un big bag, previamente posicionado en la tolva del camión, el cual también se plantea un prototipo. Este sistema garantiza una operación limpia, eficiente y sin necesidad de volcado completo del recipiente. Las características específicas del sistema de descarga se detallan a continuación:

- a) Gancho superior estructural para elevación mediante grúa.
- b) Apertura de compuerta inferior para evacuación del material maduro.
- c) Descarga directa sobre big bag en rollcontainer, asegurando eficiencia logística.
- d) Paredes perforadas con orificios de 1 cm², distribuidos homogéneamente, que favorecen la aireación pasiva del material durante el proceso de maduración, contribuyendo al control de temperatura y la reducción de olores.

En el interior del compostador se dispondría de un sistema de filtrado pasivo, cuya función es impedir la infiltración de lixiviados hacia el entorno durante el proceso. Además, se ha dejado un compartimiento técnico adicional, previsto para la instalación de un biofiltro en fases futuras del proyecto, con el objetivo de mitigar emisiones odoríferas en zonas de mayor sensibilidad ambiental.

El prototipo se puede observar en la Figura 4. 36.

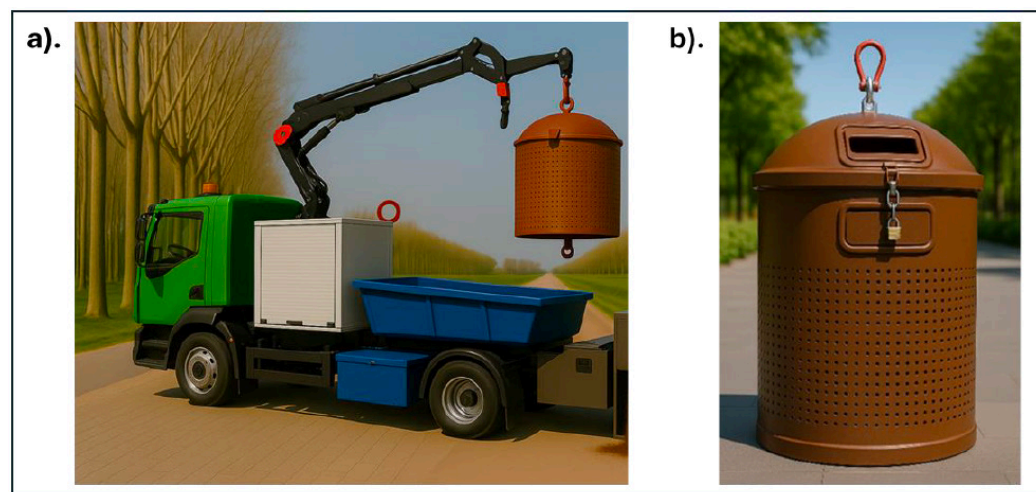


Figura 4.36. Prototipo de nuevo compostador en un SDC. (a): Unidad móvil equipada con grúa hidráulica y contenedor recolector de compost maduro. Se observa el proceso de izado del compostador mediante gancho superior para su descarga en la tolva azul mediante la apertura del gancho inferior. (b): Detalle del compostador fabricado en plástico reciclado de alta resistencia, con paredes perforadas (orificios de 1 cm²) que permiten la aireación pasiva durante la maduración. La tapa superior dispone de una apertura de carga y sistema de anclaje para el izado mecánico con grúa.

4.1.12. Propuesta conceptual de camión multifuncional para compostaje descentralizado

Además del diseño del compostador, se propone un prototipo conceptual de camión multifuncional que podría operar como unidad logística móvil para el compostaje comunitario descentralizado (Figura 4. 37). Este diseño, aún no implementado ni probado, se plantea únicamente como una referencia orientativa para futuras líneas de investigación y desarrollo tecnológico. Su objetivo es integrar en un solo vehículo los elementos clave del proceso de maduración, monitoreo y manejo de compost, bajo criterios de eficiencia operativa, ergonomía y control ambiental.

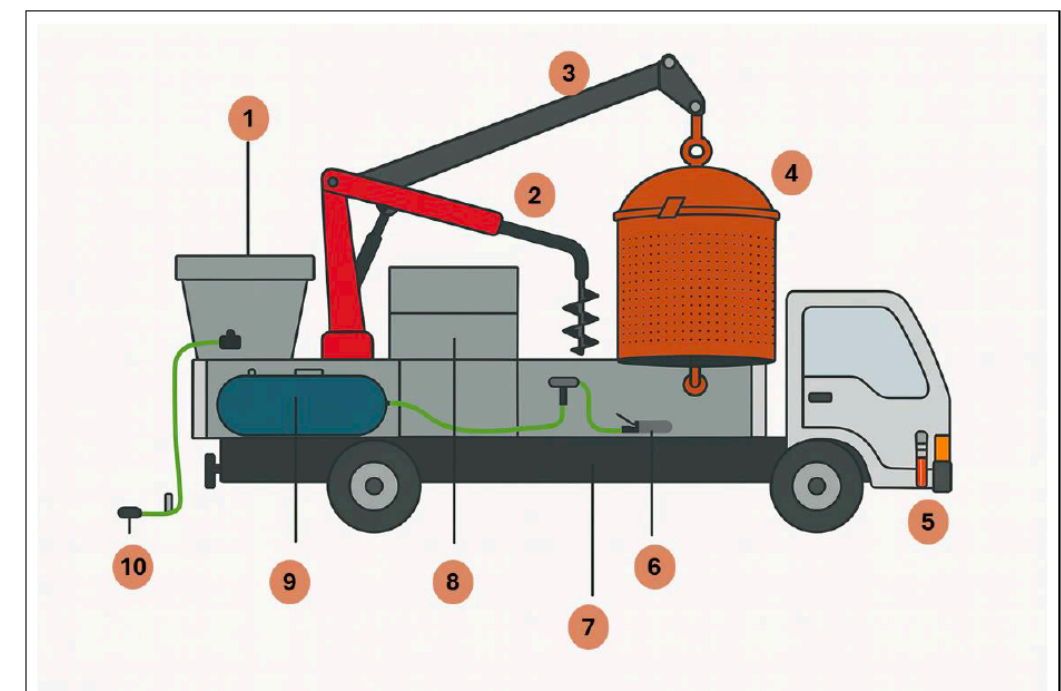


Figura 4.37. Propuesta conceptual de camión multifuncional para el SDC. Fuente: *Elaboración propia*

El diseño integra componentes clave para la gestión operativa de compostadores, desde la manipulación, el suministro de estructurante y agua, hasta el monitoreo de parámetros ambientales.

La propuesta contempla los siguientes componentes:

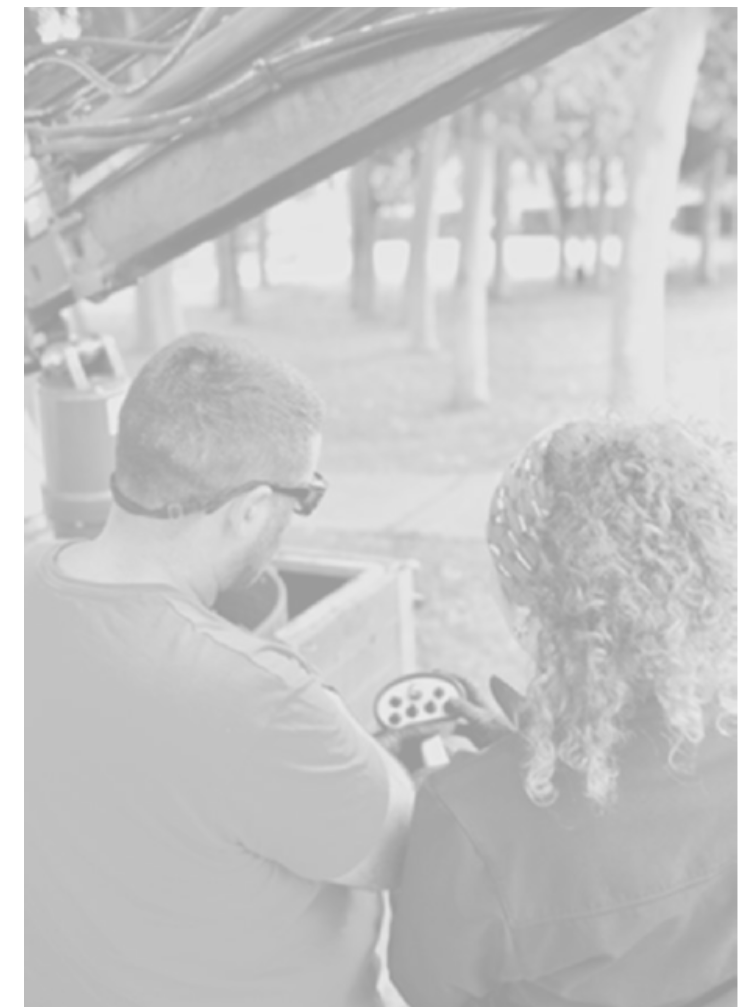
- 1) Tolva, diseñada para el almacenamiento y dispensación de estructurante seco (como poda triturada), con opción para incorporar un sistema de dosificación manual o automatizado.
- 2) Grúa hidráulica equipada con sinfín mezclador, concebida para facilitar el volteo o la mezcla profunda de la materia orgánica directamente en los compostadores.
- 3) Sistema de gancho hidráulico, destinado a la elevación y descarga segura de compostadores móviles.
- 4) Compostador modular, con las características técnicas descritas previamente, incluyendo paredes perforadas, tapa de acceso y sistema de descarga inferior.

- 5) Módulo de almacenamiento y gestión de datos, donde se alojarían sensores y dispositivos para registrar parámetros críticos como temperatura, humedad, pH, oxígeno disuelto y emisiones gaseosas.
- 6) Manguera de riego conectada al depósito, que permitiría el ajuste de la humedad del material en función de la etapa de maduración.
- 7) Depósito de agua con bomba autónoma, que alimenta el sistema de riego con control de caudal.
- 8) Compartimiento de descarga, para el compost maduro que se transportará a la etapa de tamizado.
- 9) Tanque de almacenamiento de agua, que permite asegurar disponibilidad para el ajuste de humedad y limpieza del equipo.
- 10) Sistema de monitoreo in situ, compuesto por sondas de oxígeno y un termómetro digital de varilla larga, para verificar la aireación y temperatura del material de forma directa y precisa.

Complementariamente, el vehículo incluiría un panel de control del operador, desde el cual sería posible activar y gestionar los distintos sistemas integrados (grúa, sinfín, riego, sensores), así como registrar y almacenar mediciones de manera digital. También se prevé un espacio para almacenamiento de herramientas auxiliares tales como palas, rastrillos y tamices.

CAPÍTULO IV. SECCIÓN 2

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL



CAPÍTULO IV. SECCIÓN 2

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL

En la sección anterior, se abordaron los escenarios del modelo de compostaje comunitario descentralizado desde una perspectiva técnica, evaluando aspectos operativos como el esfuerzo físico requerido, la eficiencia de los distintos métodos de tratamiento y las condiciones de funcionamiento óptimas para cada alternativa. Este análisis permitió identificar las configuraciones más viables en términos de desempeño técnico y eficiencia de proceso.

Sin embargo, comprender la efectividad de un sistema de gestión de residuos no puede limitarse únicamente a los aspectos técnicos. Por ello, en esta segunda sección del capítulo, se amplía la evaluación hacia dos dimensiones igualmente cruciales: la económica y la social.

Desde el punto de vista económico, se examinan tanto los costes de inversión (CAPEX) como los de operación (OPEX) asociados a los distintos escenarios implementados. Además, se analiza la viabilidad financiera del sistema, teniendo en cuenta factores como el retorno del canon y los ahorros generados por la optimización de procesos. Esta visión permite valorar no solo la eficiencia del modelo, sino también su sostenibilidad a largo plazo.

A continuación, se incorpora la dimensión social, enfocándose en la percepción y participación de la comunidad, el impacto generado en términos de empleo local, educación ambiental y cohesión social, así como el uso y distribución del compost producido. Esta perspectiva permite entender el nivel de aceptación ciudadana y el grado de apropiación del sistema por parte de los habitantes de Les Masies de Roda.

Este enfoque integral contribuye a consolidar una visión completa del modelo de compostaje comunitario, integrando los aspectos técnicos, económicos y sociales que lo definen como una estrategia sostenible y replicable para la gestión descentralizada de residuos orgánicos.

4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL

4.2.1. Evaluación económica

4.2.1.1. Costes de inversión (CAPEX)

Los costes de capital (CAPEX) se componen fundamentalmente de dos categorías principales: los costes de capital fijo (Fixed Capital Cost, FCC) y los costes de capital circulante (Working Capital Cost, WCC).

El FCC incluye aquellos gastos asociados a las obras civiles necesarias para la adecuación de los espacios donde se desarrollan las actividades de compostaje, tales como las áreas de tratamiento y las zonas de tamizado, así como los costes de instalación de los equipos implicados, entre ellos los compostadores, la maquinaria de cribado y los equipos operativos.

Por su parte, el WCC hace referencia a los gastos operativos incurridos antes del inicio formal de las actividades del sistema, e incluye las partidas destinadas a la adquisición de materias primas, insumos almacenados y equipamiento básico, como herramientas de trabajo, materiales estructurales y vestimenta de protección, entre otros (Zheng *et al.*, 2023).

La Tabla 4.15 presenta el desglose de los costes de inversión (CAPEX) correspondientes a cada uno de los escenarios evaluados. Se observa que determinados componentes mantienen un valor constante entre escenarios, tales como las obras civiles asociadas al área de compostaje, las infraestructuras para el postratamiento, la maquinaria de tamizado, las trituradoras y los implementos básicos de trabajo (incluyendo vestimenta, herramientas y utensilios). Asimismo, permanecen invariables los materiales entregados a la ciudadanía para facilitar la separación en origen, como los recipientes para materia orgánica y las bolsas compostables.

Por otro lado, las principales diferencias en los costes de inversión entre escenarios se explican por el tipo de equipamiento destinado a la operación de los compostadores. En los escenarios manuales, se recurre a dispositivos más simples, como remolques básicos, mientras que en los escenarios mecanizados se incorporan equipos de mayor complejidad técnica y coste unitario superior, tales como camiones, mezcladoras automáticas y grúas, lo que incrementa significativamente el CAPEX total.

Tabla 4.15. Costes de capital asociados a cada uno de los escenarios en estudio

Costes de capital (€)	Escenario 1. A	Escenario 1. B	Escenario 2. A	Escenario 2. B	Escenario 3A	Escenario 3B
Obra civil de sitios de compostaje	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550
Compostador 1000L Fácil Instalación	27,260	27,260	27,260	27,260	27,260	27,260
Estructura circular de hierro						67,280
Ropa de trabajo	993	993	993	993	993	993
Herramientas	500	500	500	500	500	500
RollContainer	3,700	3,700	6,475	6,475	925	925
Almacén de compostaje centralizado	24,300	24,300	24,300	24,300	24,300	24,300
Equipo de posprocesamiento centralizado	15,195	15,195	15,195	15,195	15,195	15,195
Bolsa grande con hebillas	1,080	1,080	1,080	1,080	540	540
Bolsa grande con asas	102	102	102	102	102	102
Contenedores orgánicos domésticos	900	900	900	900	900	900
Bolsas compostables	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
Estructurante	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890
Mezcladora					2,722	2,722
Camión					10,000	10,000
Crane					22,000	22,000
Remolque	7,335	7,335	7,335	7,335		
Trituradora	1,140	1,140	1,140	1,140	1,140	1,140
Total	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Costes operativos (OPEX)

Los costes operativos (OPEX) en los distintos escenarios están determinados, principalmente, por tres componentes clave: los salarios del personal, el mantenimiento de los equipos y el consumo de combustible. Estas partidas son altamente sensibles al tipo de operación implementada (manual o mecanizada) y presentan las mayores variaciones entre escenarios, lo que las identifica como *hot-spots* económicos dentro del sistema. Su comportamiento diferencial influye de manera directa en la viabilidad y sostenibilidad financiera de cada alternativa. En contraste, otros gastos operativos — como el control de plagas, el consumo eléctrico asociado a las actividades de tamizado y los análisis de calidad del compost— se mantienen constantes a lo largo de todos los escenarios evaluados.

Salarios de Personal La Tabla 4.16 presenta una comparación entre los distintos escenarios analizados en relación con los recursos humanos requeridos para la operación del sistema de compostaje comunitario. Se incluyen variables clave como el número de personas asignadas por escenario, la dedicación horaria diaria y semanal, así como el total de horas anuales y el coste salarial asociado, calculado con una tarifa estándar de 15,34 €/hora.

En los escenarios 1A, 2A, 1B y 2B —todos ellos caracterizados por una operación manual— se requiere la participación de dos personas para garantizar el funcionamiento del sistema. Esto se traduce en un número considerablemente mayor de horas dedicadas por semana y por año, alcanzando un máximo de 1.105 horas anuales en el escenario 1A. Como consecuencia directa, los costes salariales anuales para estos escenarios oscilan entre 22.765 € y 33.901 €, reflejando el alto grado de intensidad laboral implicado.

En contraste, los escenarios 3A y 3B, que incorporan un mayor nivel de mecanización, requieren solo una persona operadora, y presentan una reducción significativa tanto en el número de horas de trabajo como en el coste total anual de personal. En el escenario 3A, se contabilizan 663 horas anuales, con un coste salarial de 10.170 €, mientras que en el escenario 3B —el más eficiente en términos de dedicación horaria— se registran 531 horas/año, con un coste correspondiente de 8.146 €.

Estos datos confirman que la mecanización del sistema no solo reduce el esfuerzo físico requerido, sino que además optimiza los recursos humanos, generando importantes ahorros en términos de costes operativos relacionados con el personal.

Tabla 4.16. Costes asociados al personal

Item	Escenario 1. A	Escenario 2. B	Escenario 2. A	Escenario 2. B	Escenario 3A	Escenario 3B
Personal	2	2	2	2	1	1
Número de horas de dedicación por día en total	7.1	3.9	6.8	3.6	3.2	2.6
Número de horas por semana	21.30	15.30	20.20	14.30	12.80	10.20
Número de horas por año (total de personal)	1105	798	1049	742	663	531
Salario al año (€)	33,901	24,483	32,183	22,765	10,170	8,146

Fuente: Elaboración propia

*Este valor (€15,34) corresponde al coste empresa por hora trabajada, calculado a partir del salario anual bruto y la jornada laboral anual (ver metodología).

Manejo manual de cargas y costos de personal: Las actividades operativas identificadas como las que requirieron el manejo más manual de las cargas fueron la mezcla y los transvases. Además, se comprobó que el esfuerzo físico determina el tiempo que se tarda en realizar cada actividad, así como el número de personas y la frecuencia y el número de horas por actividad es proporcional al costo de cada una de estas actividades, observándose menores costos en las actividades cuyos escenarios son mecanizados (3A y 3B) y mayores costos en escenarios manuales. La Figura 4.38 muestra los costos personales por escenario:

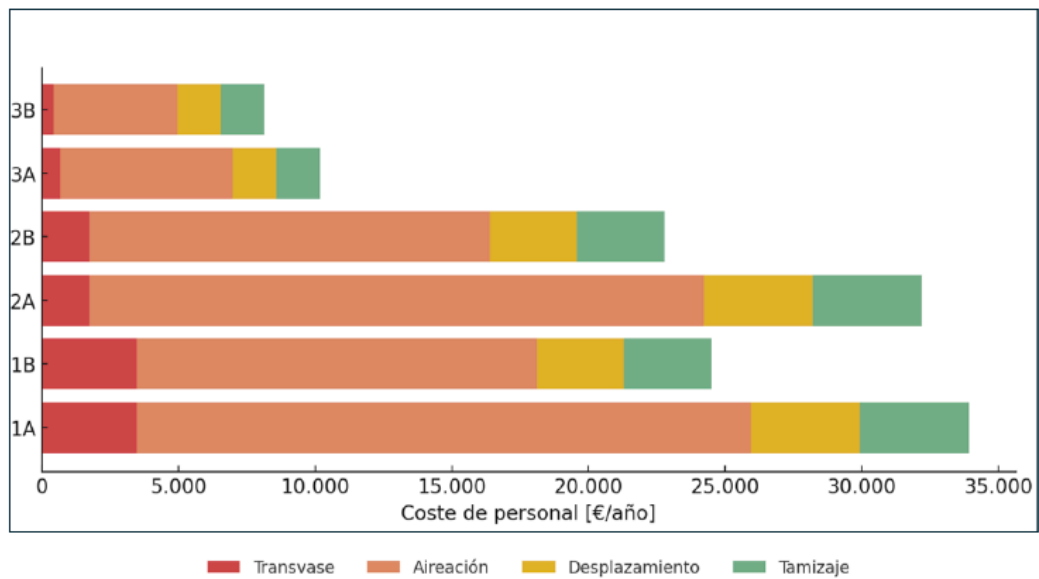


Figura 4.38. Representación del coste por cada actividad de la operación

Independientemente de la frecuencia de operación, los escenarios manuales generaron el mayor número de horas de trabajo, lo que se traduce en un incremento significativo de los costes asociados al personal. Esta diferencia en el volumen de horas se debe, en gran parte, a la frecuencia con la que se presta el servicio en cada escenario. En consecuencia, el coste anual derivado del tiempo de atención a los compostadores es considerablemente más elevado en aquellos casos en los que la frecuencia de servicio es de tres veces por semana (9.439 €/año), en comparación con los escenarios que operan con una frecuencia de dos veces por semana.

Consumo de combustible: El consumo de combustible presenta diferencias sustanciales entre los escenarios manuales y mecanizados, atribuibles principalmente a la naturaleza del equipamiento utilizado en cada caso. En los escenarios mecanizados, la utilización de maquinaria de mayor complejidad y capacidad operativa, como camiones con sistemas de mezclado integrados, implica una demanda energética superior respecto a los vehículos más ligeros empleados en las operaciones manuales. Esta diferencia estructural en los medios técnicos condiciona el rendimiento energético por kilómetro recorrido y repercute directamente en el análisis de los costes operativos asociados.

La Tabla 4.17 compara los escenarios manuales y mecanizados del sistema de compostaje descentralizado en cuanto a kilómetros recorridos, consumo de combustible y costos anuales asociados.

Aunque en los escenarios mecanizados el consumo específico de combustible es mayor (0,80 L/km frente a 0,24 L/km), y en consecuencia también lo es el coste anual por combustible (2.471 €/año frente a 1.112 €/año), este aumento no representa un impacto económico significativo si se lo compara con el principal factor de gasto en los escenarios manuales.

De hecho, el mantenimiento de escenarios manuales implica una carga operativa mucho mayor en horas de trabajo humano, lo que se traduce en un incremento considerable de los costos laborales. Ningún ahorro en combustible en los escenarios manuales es suficiente para compensar estos valores elevados en salarios y tiempo requerido por parte del personal operativo.

En ese sentido, los escenarios mecanizados, a pesar de requerir más combustible por kilómetro recorrido, resultan más eficientes económicamente gracias a la reducción de horas-hombre, minimización del esfuerzo físico y optimización del tiempo operativo.

Tabla 4.17. Comparación del consumo de combustible y costos operativos entre escenarios manuales y mecanizados

Parámetro	Unidad	ESCENARIO	
		Manual	Mecanizado
Frecuencia de operación	Km recorridos/año	2,500	1,700
Consumo específico de combustible	Litros/km	0.24	0.8
Consumo total de combustible	Litros/año	570	1,330
Precio medio del combustible	€/litro	1.8	1.8
Coste anual de combustible	€/año	1,026	2,394

Fuente: Elaboración propia

Mantenimiento de equipos: Este rubro agrupa los costes relacionados con el funcionamiento y conservación de los vehículos utilizados en los distintos escenarios. En los escenarios manuales, se contempla el alquiler de una furgoneta a la que se acopla un remolque con pluma, incluyendo en este caso los seguros, la limpieza periódica y las tareas de mantenimiento tanto de la furgoneta como del remolque.

Además, el remolque requiere revisiones técnicas regulares, en particular del sistema de iluminación y el estado de las ruedas, así como un seguro independiente para su circulación. Al tratarse de un vehículo alquilado, estos costes se consideran íntegramente como gasto operativo (OPEX), sin generar activos fijos para el proyecto.

En contraste, en los escenarios mecanizados, el camión con sistema de mezclado fue adquirido como parte de la inversión inicial del proyecto, lo cual implica que sus costes de mantenimiento se imputan sobre un bien de capital. Esta diferencia estructural en el modelo de adquisición repercute tanto en la contabilización como en la proyección económica a largo plazo de cada escenario. La siguiente Tabla presenta un resumen comparativo de los costes operativos por escenario.

Tabla 4.18. Diferencias del OPEX por escenario

Costes de funcionamiento (€/año)	Escenario 1. A	Escenario 1. B	Escenario 2. A	Escenario 2. B	Escenario 3A	Escenario 3B
Salarios del personal	33,901	24,483	32,183	22,765	10,170	8,146
Consumo de combustible	1,027	1,027	1,027	1,027	2,400	2,400
Consumo eléctrico	60	60	60	60	60	60
Mantenimiento de equipos	5,540	5,540	5,540	5,540	1,200	1,200
Control de plagas	254	254	254	254	254	254
Análisis de compost	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069
Total	41,851	32,433	40,133	30,714	15,153	13,129

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3. Ahorros generados y optimización operativa

La siguiente Tabla presenta una comparación detallada entre los distintos escenarios operativos, considerando variables clave como el número de transvases por ciclo, las horas anuales dedicadas a actividades operativas (mezcla, transvase, desplazamientos y tamizado) y los costes asociados al personal.

Los datos evidencian que los escenarios manuales (1A, 1B, 2A y 2B) requieren una cantidad significativamente mayor de tiempo, particularmente en las actividades de aireación y transvase. Por ejemplo, los transvases demandan 113 y 57 horas anuales en los escenarios 1A/2A y 1B/2B, respectivamente, mientras que en los escenarios mecanizados (3A y 3B), esta actividad se reduce a 43 y 28 horas por año. La aireación, que representa hasta el 62 % del tiempo total de operación en los escenarios manuales, alcanza las 732 h/año (1A y 2A) y 477 h/año (1B y 2B), en comparación con 412 h/año y 295 h/año en los escenarios 3A y 3B, respectivamente.

Esta reducción significativa en la carga de trabajo en los escenarios mecanizados se traduce en un ahorro económico considerable. Al comparar escenarios con frecuencias equivalentes, como 1B y 2B frente a 3A, se observan ahorros anuales en costes de personal de 14.325 € y 12.586 €, respectivamente (Tabla 4.19). Estos resultados subrayan la eficiencia de la mecanización no solo en términos de tiempo operativo, sino también como estrategia eficaz para la contención de costes dentro de sistemas de compostaje comunitario descentralizado.

Aunque los escenarios manuales con mayor frecuencia operativa (1A y 2A) muestran una carga aún más elevada, la tendencia de ahorro se mantiene de forma consistente a favor de los escenarios mecanizados. En conjunto, los datos refuerzan la identificación de los costes de personal como uno de los principales *hot-spots* económicos del sistema, y posicionan a los escenarios 3A y 3B como las opciones más sostenibles y viables para la implementación de modelos descentralizados de compostaje.

Tabla 4.19. Tiempos operativos anuales y costes de personal por escenario de compostaje							
Actividad	Units	Escenario 1A/1B		Escenario 2A/2B		Escenario 3A/3B	
		1A	1B	2A	2B	3A	3B
Número de Transvase por ciclo	Transvase/Ciclo	2	2	1	1	0	0
**Transvase	Horas/año	113	113	57	57	43	28
**Aireación		732	477	732	477	412	295
Desplazamientos y cribado		260	208	260	208	208	208
Total		1105	798	1049	742	663	531
Coste de personal por escenario	€/año	33,922	24,483	32,183	22,744	10,158	8,146
Diferencia de costos por frecuencia de operación manual							
Diferencia entre escenarios manuales	€/año	9,439					
Ahorro de costes por tipo de operación manual y mecanizada							
Diferencia entre 1B y 3A	€/año	14,325					
Diferencia entre 2B y 3A	€/año	12,586					

*Las frecuencias de los escenarios 1A y 2A se atienden tres veces por semana / cada compostador y las frecuencias de los escenarios 1B y 2B se atienden dos veces por semana / cada compostador.
** Escenarios 1A, 1B, 2A y 2B agitación manual y Escenarios 3A y 3B agitación mecánica. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.4. Viabilidad económica del escenario 3A

Para este estudio, el flujo de caja anual se ha definido como el ahorro económico generado por el nuevo sistema de compostaje comunitario descentralizado (escenario 3A) en comparación con el modelo anterior de gestión centralizada de la fracción orgánica (modelo SCC). En este último, los costes asociados al transporte, tratamiento y disposición final de la FORM —incluyendo tanto la fracción separada en origen como la depositada en el contenedor gris— ascendían a aproximadamente 17.000 €/año, tras aplicar el retorno del canon correspondiente.

La implementación del modelo descentralizado, basado en 58 compostadores comunitarios operativos, permite reducir considerablemente estos costes gracias a tres factores clave: la optimización de los procesos operativos, la mecanización de las tareas

críticas (mezcla y transferencia), y la devolución del canon por compostador, fijada en 300 €/unidad, lo que representa un retorno anual de 17.400 €. Este conjunto de ahorros constituye el flujo de caja utilizado en el análisis de viabilidad económica.

En el escenario 3A, con una inversión inicial de 118.517 € y unos costes operativos anuales de 15.141 €, los resultados económicos son favorables. Con un retorno del canon de 165 €/compostador y una tasa de descuento del 5 %, el Valor Actual Neto (VAN) se sitúa en cero, alcanzando el punto de equilibrio con una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 5 % y un Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) de 10 años. Si el canon se incrementa a 300 €/compostador, el VAN se vuelve positivo, la TIR alcanza el 14 % y el PRI se reduce a 7 años con una tasa de descuento del 5 %, o a 6 años con una tasa del 7 %.

En contraste, los escenarios manuales (1A, 1B, 2A y 2B) arrojan un VAN negativo. Esto se debe al elevado esfuerzo físico requerido, que implica un mayor número de horas de trabajo y, por ende, un incremento sustancial de los costes operativos. Como resultado, estos escenarios no pueden considerarse económicamente viables dentro del sistema evaluado.

Adicionalmente, al aplicar una tasa de descuento del 7 %, el punto de equilibrio del escenario 3A se alcanza con un retorno del canon de 193 €/compostador, y el VAN se torna positivo a partir de 194 €/compostador, con un PRI de 9 años. Si el municipio asume únicamente la inversión inicial, y se garantiza un retorno del canon de al menos 165 €/compostador (al 5 %) o 194 €/compostador (al 7 %), el flujo de caja generado permitiría cubrir tanto los costes operativos anuales como la recuperación completa de la inversión en un plazo máximo de 10 años. Bajo estas condiciones, el sistema sería financieramente sostenible sin necesidad de aplicar una carga adicional sobre la ciudadanía durante el periodo de amortización.

Como alternativa, la inversión inicial podría ser financiada por el Plan Territorial Sectorial de Infraestructuras Municipales de Cataluña o asumida directamente por el ayuntamiento, manteniéndose el financiamiento de los costes operativos mediante el tributo municipal correspondiente. En términos generales, los resultados confirman que, con un retorno del canon de 300 €/compostador, el modelo no solo es económicamente viable, sino que además permite reducir el periodo de recuperación de la inversión a 7 años (al 5 %) o 6 años (al 7 %), generando un VAN positivo y una TIR del 14 %.

Aun en ausencia de dicho nivel de retorno, el sistema descentralizado presenta una estructura de costes operativos inferior a la del modelo centralizado, lo que refuerza su eficiencia estructural y su viabilidad económica. No obstante, en este último caso sería necesario establecer mecanismos complementarios de financiación pública que permitan cubrir la inversión inicial y facilitar su implementación.

La Figura 4.39 ilustra visualmente la evolución del Valor Actual Neto (VAN) en función del retorno del canon por compostador, considerando tasas de descuento del 5 % y 7 %. Esta representación gráfica complementa el análisis anterior al mostrar de forma clara los umbrales a partir de los cuales el modelo se vuelve económicamente viable, así como la sensibilidad del VAN ante variaciones en el canon. Se evidencia cómo un canon de 165 €/compostador (al 5 %) o 194 €/compostador (al 7 %) marcan el punto de equilibrio del sistema, y cómo valores superiores permiten una recuperación más rápida de la inversión. Esta Figura refuerza la conclusión de que el modelo descentralizado no solo es más eficiente en términos operativos que el modelo centralizado, sino que también ofrece una viabilidad económica sólida cuando se garantiza un nivel razonable de retorno institucional.

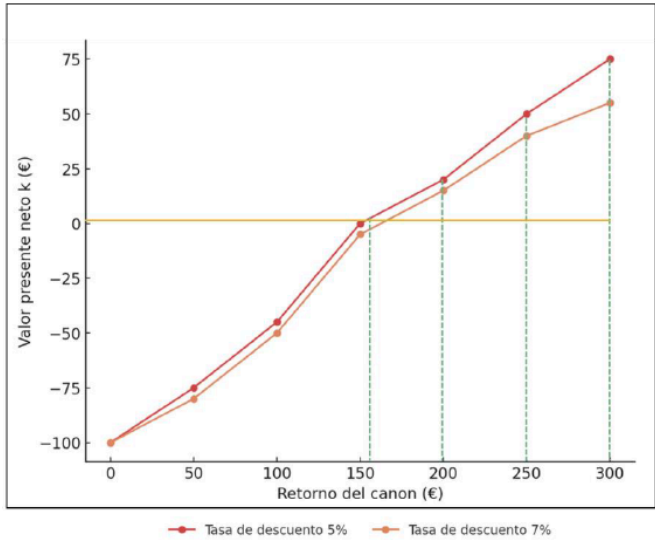


Figura 4.39. Valor presente neto. Fuente: Elaboración propia

Evaluación Económica por escenario: La Tabla 4.20 presenta los resultados de la evaluación económica de los distintos escenarios operativos, considerando niveles progresivos de retorno del canon por compostador. Los escenarios manuales (1A–2B) presentan VAN negativos en todos los casos, incluso con retornos de canon elevados, debido al alto coste operativo asociado al esfuerzo físico. En contraste, los escenarios mecanizados (3A y 3B) muestran una evolución positiva del VAN a medida que el canon aumenta. En particular, el escenario 3A alcanza el punto de equilibrio con un canon de 165 €/compostador (tasa de descuento del 5 %) y el 3B con un canon de 194 €/compostador (al 7 %). Con un canon de 300 €, ambos escenarios resultan claramente viables, con TIR superiores al 14 % y recuperación de la inversión en 9 años o menos.

Tabla 4.20. Evaluación económica por escenario y retorno del canon

RETORNO DEL CANON (€/año)	INDICADOR	ESCENARIO					
		1A	1B	2A	2B	3A	3B
0	Inversión Inicial (€)	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797
	Costos Operativos (€/año)	41,872	32,433	40,133	30,694	15,141	13,129
	VAN (€) con tasa de interés (5 %)	- 376,680	- 278,706	- 358,630	- 260,656	- 99,221	- 78,337
60	Inversión Inicial (€)	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797
	Costos Operativos (€/año)	41,872	32,433	40,133	30,694	15,141	13,129
	VAN (€) con tasa de interés (5 %)	- 340,559	- 242,585	- 322,508	- 224,534	- 63,100	- 42,216
165	Inversión Inicial (€)	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797
	Costos Operativos (€/año)	41,872	32,433	40,133	30,694	15,141	13,129
	VAN (€) con tasa de interés (5 %)	- 277,347	- 179,372	- 259,296	- 161,322	112	20,995
	PRI (años)	–	–	–	–	9	9
	Tasa interna de retorno (%)	–	–	–	–	5	8
	VAN (€) con tasa de interés (7 %)	–	–	–	–	- 14,422	3,902
	PRI (años)	–	–	–	–	–	9
	Tasa interna de retorno (%)	–	–	–	–	–	7

Tabla 4.20. Evaluación económica por escenario y retorno del canon. Continuación							
RETORNO DEL CANON (€/año)	INDICADOR	ESCENARIO					
		1A	1B	2A	2B	3A	3B
194	Inversión Inicial (€)	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797
	Costos Operativos (€/año)	41,872	32,433	40,133	30,694	15,141	13,129
	VAN (€) con tasa de interés (5 %)	- 259,888	- 161,914	- 241,837	- 143,864	17,570	38,454
	PRI (años)	–	–	–	–	9	9
	Tasa interna de retorno	–	–	–	–	7	10
	VAN (€) con tasa de interés (7 %)	–	–	–	–	896	19,221
	PRI (años)	–	–	–	–	–	9
	Tasa interna de retorno (%)	–	–	–	–	–	10
300	Inversión Inicial (€)	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797
	Costos Operativos (€/año)	41,872	32,433	40,133	30,694	15,141	13,129
	VAN (€) con tasa de interés (5 %)	- 196,074	- 98,100	- 178,023	- 80,049	81,384	102,268
	PRI (años)	–	–	–	–	9	9
	Tasa interna de retorno	–	–	–	–	14	16
	VAN (€) con tasa de interés (7 %)	–	–	–	–	56,892	75,217
	PRI (años)	–	–	–	–	9	9
	Tasa interna de retorno	–	–	–	–	14	16

Fuente: Elaboración propia

Costo por tonelada de FORM segun cada escenario. A partir de los datos presentados en la Tabla 4.21, se puede observar el coste operativo por tonelada de materia orgánica tratada en cada uno de los escenarios evaluados. Al comparar estos valores con el coste del modelo anterior de gestión centralizada, estimado en 189 €/t, se destaca que el escenario 3A, correspondiente al modelo actual de compostaje comunitario descentralizado, presenta un coste inferior (168 €/t). Esta diferencia confirma que, además de ser operativamente más eficiente, el sistema descentralizado

implementado en el escenario 3A resulta también más económico por unidad de materia tratada, lo que refuerza su viabilidad como alternativa sostenible de gestión de la fracción orgánica.

Tabla 4.21. Coste por tonelada tratada en los distintos escenarios operativos						
Costo por tonelada (€/t)	ESCENARIO					
	1A	1B	2A	2B	3A	3B
	465	360	446	341	168	146

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.5. Análisis de sensibilidad del OPEX ante variaciones en los costes laborales

Como se ha evidenciado a lo largo de este análisis, los costes laborales constituyen el *hot-spot* principal dentro del gasto operativo (OPEX) de ambos modelos de gestión de la fracción orgánica. En el sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC), estos representan aproximadamente el 67 % del OPEX total, mientras que en el sistema centralizado (SCC) alcanzan un 55 %. Esta diferencia refleja una mayor intensidad de mano de obra en el modelo SDC, lo que lo hace particularmente sensible ante variaciones salariales.

En contraste, aunque el modelo SCC presenta un mayor consumo energético debido a su mecanización, el impacto relativo de este componente sobre el OPEX es considerablemente menor en comparación con los costes laborales. Esto indica que las fluctuaciones en los precios de la energía tienen un efecto limitado sobre la viabilidad económica global de ambos sistemas.

La Figura 4.40 ilustra la evolución del OPEX ante incrementos progresivos en los costes de personal. Se observa que, a partir de un aumento del 100 % en los salarios, el coste operativo del modelo SDC supera al del modelo SCC, invirtiendo la relación inicial de viabilidad. Este punto de cruce representa un umbral crítico, más allá del cual el modelo centralizado se vuelve económicamente más favorable.

La pendiente más pronunciada del modelo SDC en esta proyección confirma su alta sensibilidad estructural a los costes laborales, lo cual constituye un hallazgo

relevante para la toma de decisiones públicas, especialmente en contextos de presión inflacionaria o de reformas regulatorias que afecten directamente a las condiciones de empleo en el sector ambiental.

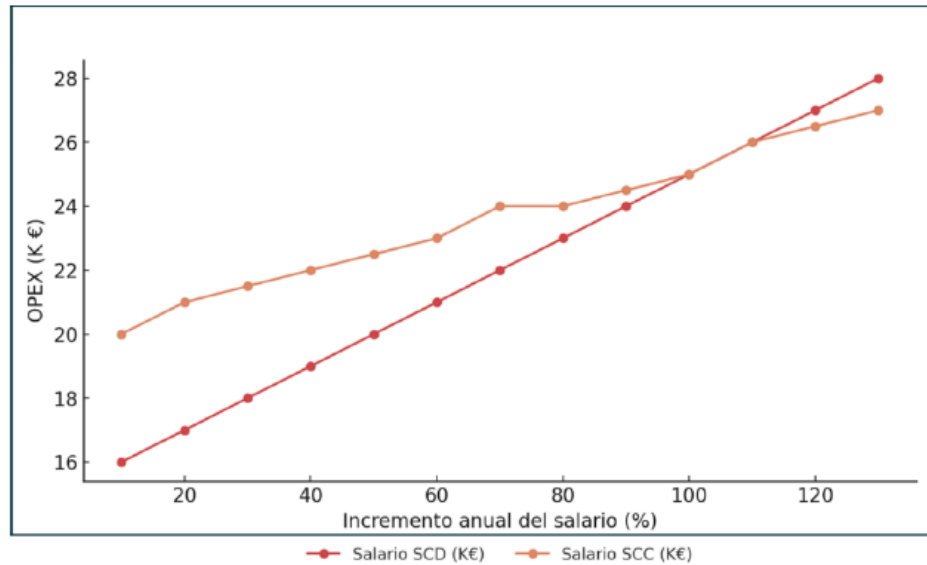


Figura 4.40. Análisis de sensibilidad del gasto operativo (OPEX) ante variaciones en los costes laborales.

4.2.1.6. Consideraciones sobre el escenario 3B

El escenario 3B, caracterizado por un mayor grado de mecanización en las operaciones, se presenta como el más eficiente en términos de reducción de la carga física sobre los operarios y disminución de los costes operativos. No obstante, este escenario corresponde a una propuesta en fase experimental, lo que implica ciertas limitaciones respecto a su implementación inmediata a escala real.

Desde el punto de vista del diseño, el modelo 3B plantea la necesidad de adaptar los compostadores para permitir un uso más eficiente del mezclador mecánico y facilitar el manejo del tambor metálico, tal como se describió en el capítulo 4, sección 1 Resultados técnicos. Esta adaptación en el diseño tendría como objetivo mejorar la ergonomía del sistema y optimizar el tiempo de operación. Se espera que dicha adaptación implique una reducción en los costes de inversión, ya que permitiría sustituir parte del equipamiento actualmente utilizado por componentes más funcionales y de menor coste unitario. Sin embargo, dado que este nuevo diseño aún

no se encuentra disponible comercialmente, no ha sido posible estimar con precisión su coste de capital (CAPEX).

Por tal motivo, el análisis detallado de viabilidad económica se ha centrado en el escenario 3A, cuya implementación y costes asociados se encuentran completamente definidos y documentados. No obstante, se reconoce el potencial del escenario 3B para mejorar aún más la eficiencia del modelo de compostaje descentralizado comunitario, siempre que se logre consolidar un diseño optimizado y económicamente competitivo.

4.2.2. Evaluación social

La evaluación social de este estudio busca analizar los impactos sociales del sistema de compostaje comunitario descentralizado en Les Masies de Roda, destacando su contribución a la participación ciudadana, igualdad de género, cohesión social y sostenibilidad local. Siguiendo un enfoque de investigación aplicada, se articulan datos cuantitativos de encuestas y actividades de sensibilización con marcos teóricos de gobernanza ambiental y economía circular.

Los resultados, muestran impactos positivos significativos en múltiples dimensiones vinculadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), 12 (producción y consumo responsables) y 13 (acción por el clima). Participaron actores diversos: ciudadanía general, personal técnico municipal, comunidad educativa, asociaciones locales y el equipo técnico del proyecto DECOST. Se llevaron a cabo más de 30 actividades de sensibilización, alcanzando a 1805 participantes, fortaleciendo capacidades locales y promoviendo la adopción de prácticas sostenibles. Los resultados indican un alto nivel de conocimiento (100 %) y satisfacción (94 %) respecto al sistema, así como una percepción positiva de sus beneficios ambientales, sociales y económicos. Además, el proyecto contribuyó a la creación de empleo verde, fomentó la equidad de género mediante la formación de mujeres operarias y técnicas, y consolidó redes de cooperación institucional que promueven la sostenibilidad y el desarrollo comunitario.

La aplicación combinada de las metodologías aplicadas (SIA y la lógica del SROI) facilitan la cuantificación de los beneficios sociales generados —como la creación de capital social, el fortalecimiento institucional y la mejora de capacidades comunitarias— De este modo, la evaluación social del sistema de compostaje

comunitario no se limita a describir resultados, sino que los posiciona dentro de un marco internacionalmente reconocido para la planificación y mejora continua de intervenciones socioambientales.

4.2.2.1. Percepción de la población

Para evaluar la experiencia de la ciudadanía en relación con el sistema de compostaje comunitario, se diseñó y aplicó una encuesta estructurada en tres secciones: conocimiento del nuevo sistema de gestión de residuos puerta a puerta y del compostaje comunitario, nivel de satisfacción y dificultades encontradas en el uso de los compostadores, y frecuencia de utilización. Los resultados revelaron un conocimiento generalizado del sistema por parte de la población, así como altos niveles de satisfacción, destacando la percepción de beneficios ambientales y mejoras en la limpieza del municipio. Además, se identificó un uso regular del sistema por parte de la mayoría de los encuestados, lo que evidencia la aceptación social del modelo y su contribución a la sostenibilidad local.

Conocimiento sobre el nuevo sistema de gestión de residuos: Los resultados de la encuesta muestran un elevado nivel de conocimiento de la ciudadanía respecto al nuevo sistema implantado en LMR. El 100 % de los encuestados indicó conocer el funcionamiento del modelo de recogida y compostaje comunitario. Además, el 94 % considera que el nuevo sistema es más eficiente que el anterior y el 97 % opina que contribuye de manera significativa a mantener el municipio más limpio (Figura 4.41). Estos datos reflejan una penetración informativa completa y una valoración positiva generalizada sobre la eficacia e impacto ambiental del sistema.

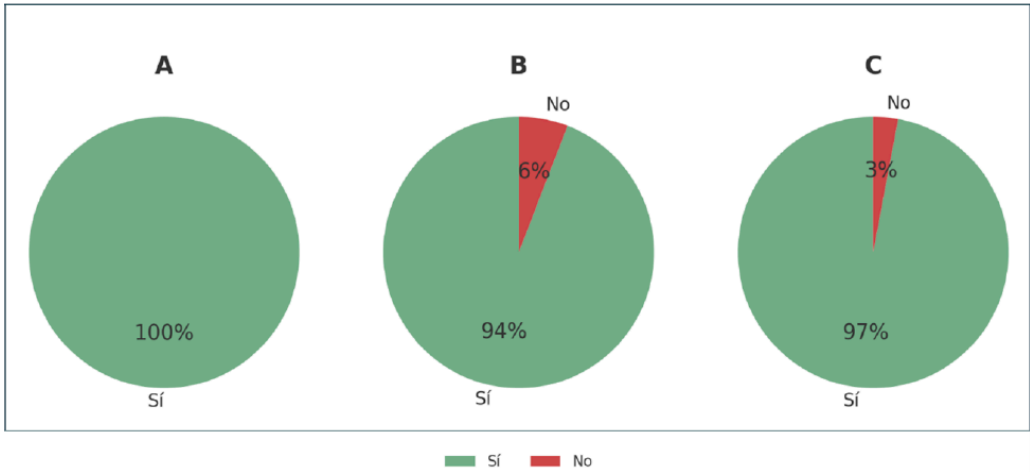


Figura 4.41. Resultados encuesta: Conocimiento de la ciudadanía respecto al nuevo sistema implantado en LMR A: ¿Conoce el nuevo sistema de recogida de residuos y compostaje de materia orgánica implantado en nuestro municipio?, B: ¿Considera que el nuevo sistema de recogida de residuos es más eficiente que el anterior?, C: ¿Crees que el nuevo sistema de recogida de residuos y compostaje de materia orgánica contribuye a mantener la ciudad más limpia que el sistema anterior?

Nivel de satisfacción y dificultades durante el uso del sistema de compostaje comunitario para el tratamiento de la materia orgánica: El 94 % de la población encuestada se declara satisfecha con el sistema, mientras que el 91 % considera que el modelo de compostaje es más respetuoso con el medio ambiente que el sistema anterior. Además, un 94 % considera comprensibles las instrucciones de uso, y la mayoría no ha experimentado dificultades significativas en su aplicación (Figura 4.42). Finalmente, en una escala de 1 a 5, el 97 % de los encuestados se ubica en los niveles de «muy satisfecho» o «satisfecho», reforzando la percepción positiva y el alto grado de aceptación comunitaria del sistema.

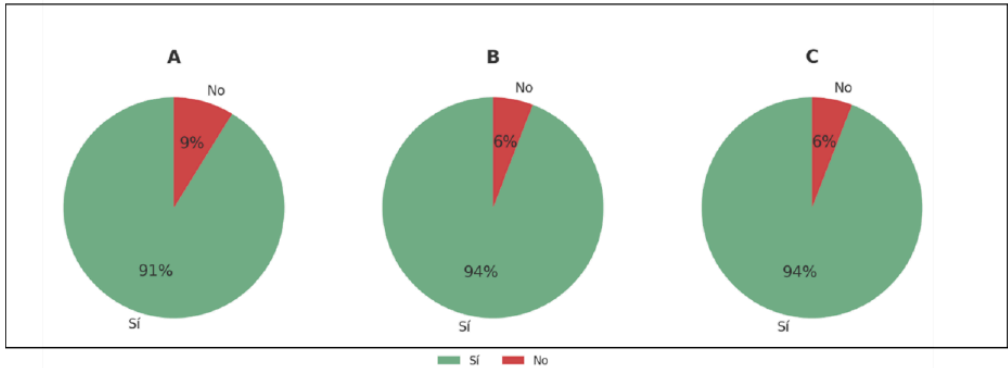


Figura 4.42. Resultados encuesta: Nivel de satisfacción A: ¿Le resulta fácil comprender y seguir las instrucciones relacionadas con el nuevo sistema de compostaje orgánico?, B: ¿Considera que el nuevo sistema de compostaje de materia orgánica es más respetuoso con el medio ambiente que el anterior?, C: ¿Está más satisfecho con el sistema actual (puerta a puerta y compostaje comunitario) o, por el contrario, estaría más satisfecho con el sistema anterior de recogida y gestión de residuos (contenedores en acera)?

Frecuencia de uso de los compostadores comunitarios: En cuanto a la frecuencia de utilización, el 18 % de los encuestados utiliza el sistema diariamente, el 26 % entre 4 y 6 veces por semana, y el 36 % entre 2 y 3 veces por semana. Un 11 % lo usa una vez por semana y un 9 % menos de una vez por semana (Figura 4.43). Quienes utilizan el sistema con mayor frecuencia valoran especialmente la disponibilidad continua de los compostadores, lo que mejora la autonomía de los usuarios y la flexibilidad operativa, facilitando su integración en las rutinas domésticas y reforzando la participación ciudadana en la gestión de residuos orgánicos.

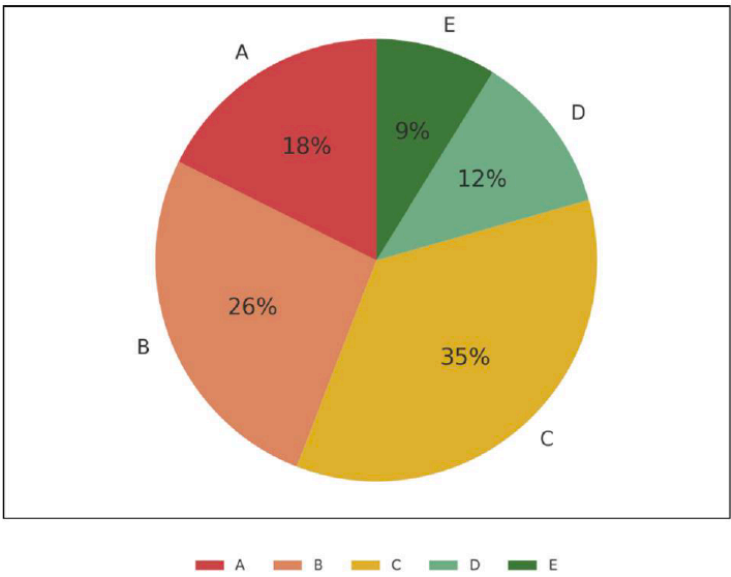


Figura 4.43. Frecuencia de uso A: Diario, B: Entre 4 y 6 veces por semana, C: Entre 2 y 3 veces por semana, D: Una vez a la semana, E: Menos de una vez por semana

Los elevados niveles de participación y satisfacción podrían estar influenciados por la naturaleza voluntaria de los instrumentos utilizados (encuestas, talleres, actividades), lo que potencialmente sobrerrepresenta a personas con mayor motivación ambiental. Esta posibilidad constituye una limitación habitual en estudios de participación ciudadana y debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados.

Percepción del riesgo y barreras sociales: Aunque la percepción de dificultades ha sido mínima, es relevante considerar posibles barreras sociales comunes en sistemas de compostaje comunitario, tales como preocupaciones sobre olores, presencia de insectos, disponibilidad de tiempo o desconocimiento inicial del proceso. La baja incidencia de estas barreras en LMR sugiere que las estrategias de acompañamiento puerta a puerta, la claridad de las instrucciones (94 % de comprensión) y la gestión técnica permanente han actuado como factores protectores, reduciendo el riesgo de rechazo social. Incorporar esta visión permite comprender mejor los mecanismos que facilitan la adopción sostenible del sistema.

4.2.2.2. Usos del compost y gestión de residuos verdes

Para optimizar los recursos y fortalecer el proceso de compostaje, se habilitó un punto específico para el almacenamiento de residuos de poda y material verde. Estos residuos eran triturados y reutilizados como agente estructurante en el sistema de compostaje. Los ciudadanos podían optar entre depositar directamente el material en el punto de acopio o solicitar su recolección (para volúmenes menores a 1 m³), asegurando así una gestión eficiente. Esta iniciativa permitió integrar de manera efectiva los residuos verdes en el proceso de compostaje, reduciendo la necesidad de insumos externos y fomentando prácticas de economía circular en la gestión local de recursos vegetales.

Entrega de compost a los habitantes y actividades educativas en colegios: Como resultado de la participación ciudadana en el sistema de compostaje comunitario, se realizó la entrega de compost a los habitantes de Les Masies de Roda, incentivando su uso en huertos domésticos y espacios verdes comunitarios. Esta acción reforzó el principio de cierre de ciclo de la materia orgánica y fomentó el compromiso ciudadano con la separación en origen. Asimismo, se desarrollaron actividades educativas en colegios, incluyendo visitas guiadas a las áreas de compostaje y postprocesamiento, donde se explicó el proceso de compostaje, la gestión de residuos orgánicos y su relevancia ambiental. También se promovió el uso de compost en agricultura urbana, destacando su potencial como fertilizante para huertos escolares y zonas verdes. Estas iniciativas fortalecieron la educación ambiental y la integración del compostaje como práctica sostenible en la comunidad. La Figura 4.44 muestra las actividades comunitarias relacionadas con la distribución y uso del compost producido en el Sistema de Compostaje Descentralizado (SCD) de Les Masies de Roda. Incluyen sesiones de entrega de compost a la ciudadanía, acompañadas de explicaciones sobre su calidad y uso; actividades con escolares para la plantación de cultivos utilizando compost local; y la distribución a vecinos para su aplicación en huertos y jardines. Estas acciones fomentan la economía circular, fortalecen el vínculo entre la comunidad y el sistema, y promueven la valorización de la fracción orgánica transformada en recurso.



Figura 4.44. Entrega y aprovechamiento del compost generado en el SCD (a) Sesión informativa y entrega de compost a vecinos (b) Actividad con escolares en huertos educativos, utilizando compost generado en el SCD. (c) y (d) Vecinos recibiendo compost para su uso en huertos y jardines, fomentando la reutilización de materia orgánica como enmienda natural.

Indicadores cuantitativos derivados: A partir de los datos recopilados se derivan indicadores sociales normalizados que permiten comparar el desempeño del SDC con modelos similares y evaluar la eficacia social del sistema.

Índice de autonomía operativa: el 80 % de la población usuaria emplea el sistema entre 2 y 6 veces por semana, lo que indica una integración del compostaje en las rutinas domésticas.

Indicador de circularidad social del compost: la entrega de 30 t/año supone 42,5 kg/hab/año de compost disponible, generando beneficios directos a 300 hogares potenciales. Estos indicadores permiten consolidar la evaluación social mediante métricas estandarizadas y replicables.

Población beneficiada por las actividades de concienciación y capacitación sobre el compostaje.

La Tabla 4.22 muestra las actividades que se realizaron durante la ejecución del proyecto DECOST para un total de 1805 participantes.

Tabla 4.22. Relación de actividades y Usuarios finales del compost producido

Nº	Título del evento	Número de actividades a ciudadanos sobre temas sobre residuos municipales	Número de actividades específicas desarrolladas para niños	Número de actividades de huertos educativos	Número de huertos comunitarios
1	Formación interna sobre compostaje en Centro Tecnológico BETA	38			
2	Semana Internacional de Concienciación sobre el Compostaje: taller en una escuela y visita a los compostadores		96		
3	Semana Internacional de Concientización sobre el Compostaje: distribución de compost en los sitios de compostaje	15			
4	Campaña de comunicación puerta a puerta para los ciudadanos de Les Masies de Roda	350			
5	Campaña de comunicación para grupos de ciudadanos para informar sobre la 1ª implementación piloto española	120			
6	Campaña de distribución del material entre la población de Les Masies de Roda	345			
7	Acto participativo para la ciudadanía en el marco de la fiesta mayor de Les Masies de Roda (Adéu-siau contenidors)	18			
8	Inicialización del piloto en LMR	750			
9	Semana Internacional del Compostaje - taller en la escuela		30	1	1
10	Semana Internacional del Compostaje - distribución de compost	42	30		
11	Distribución de compost	100			
12	Difusión del proyecto Decost durante la European Nit	20			
13	Green Week - Participación en el evento en vivo de ENI	10			

Fuente: Elaboración propia a partir del Proyecto Decost.

Usuarios finales del compost producido: Los beneficiarios del compost generado se agrupan en dos categorías principales (Tabla 4.23). En primer lugar, la población directamente implicada en la gestión de la materia orgánica, que accede al compost para su uso en huertos domésticos, jardines particulares y espacios verdes comunitarios, fortaleciendo la economía circular local. En segundo lugar, los beneficiarios indirectos, compuestos por ciudadanos, centros educativos y asociaciones locales que, sin participar directamente en el proceso, reciben formación y sensibilización ambiental sobre el valor del compostaje, favoreciendo su incorporación en proyectos de agricultura urbana y periurbana. De este modo, el compost no solo actúa como enmienda orgánica, sino que adquiere un valor educativo, ambiental y comunitario, consolidándose como un elemento estratégico en los modelos de sostenibilidad y resiliencia locales.

Tabla 4.23. Relación de usuarios finales del compost producido

Beneficio	Barrio	Número de habitantes	Porcentaje de la población beneficiada
Población beneficiada por el municipio en la gestión de residuos y uso del compost	Fontanellas	160	21 %
	Esquerda	50	7 %
	Casas Nuevas	200	26 %
	Vicentç	125	16 %
	Subtotal	535	70 %
Población beneficiada por el uso del compost	Granjas cercanas	169	30 %
Total		704	100 %

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. Impactos sociales generados

La implementación del sistema de compostaje comunitario ha generado impactos positivos en distintos niveles: fortalecimiento de capacidades institucionales, creación de empleo verde, promoción de la igualdad de género y empoderamiento comunitario. El proyecto ha permitido la formación de técnicos municipales, la incorporación de mujeres en labores técnicas y de gestión, y la consolidación de redes de colaboración local. Además, se observa un aumento de la cohesión social y la participación

comunitaria en actividades ambientales, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con ciudades sostenibles, igualdad de género y acción climática. Estos resultados refuerzan el potencial del modelo como herramienta para la transformación social y ambiental a nivel local.

La participación de mujeres en tareas técnicas y operativas del sistema constituye un avance relevante en términos de igualdad de género. Su incorporación rompe con la segregación ocupacional típica en la gestión de residuos y contribuye a incrementar la visibilidad del trabajo femenino en ámbitos técnicos rurales. Asimismo, la formación específica impartida a mujeres cabeza de familia fortalece su autonomía económica y refuerza su papel como agentes de cambio en la comunidad. Este impacto no solo se alinea con el ODS 5, sino que constituye un elemento fundamental para la sostenibilidad social del SDC.

4.2.2.4. Teoría del cambio del proyecto

La intervención puede entenderse a partir de una teoría del cambio que vincula insumos, actividades, resultados y efectos.

- **Insumos:** infraestructura de compostaje, acompañamiento técnico, materiales formativos y colaboración municipal.
- **Actividades:** formación a población y personal técnico, visitas escolares, distribución de compost, campañas puerta a puerta.
- **Resultados inmediatos:** aumento del conocimiento (100 %), mejora de la satisfacción (94 %), uso frecuente del sistema, integración del compost en huertos locales. • **Impactos:** creación de empleo verde, reducción de emisiones, fortalecimiento de redes comunitarias, empoderamiento de mujeres operarias, contribución a los ODS. Esta trayectoria permite visualizar cómo un conjunto coordinado de acciones genera cambios sociales estructurales en el municipio.

4.2.2.5. Indicadores de participación y cohesión social

El proyecto ha permitido cuantificar indicadores clave vinculados a la participación ciudadana y la cohesión social. Se registró la participación de 1805 personas en actividades de sensibilización, talleres y encuentros comunitarios. Entre los impactos

destacan la creación de empleo verde (dos nuevos puestos de trabajo en la operación de compostadores), el aumento de la participación de mujeres en procesos técnicos, y la consolidación de redes de colaboración local. Además, las encuestas evidencian un alto nivel de conocimiento y satisfacción de la población con el sistema, lo que refleja una apropiación social elevada y un fortalecimiento de la cohesión comunitaria, contribuyendo a los ODS relacionados con igualdad de género, ciudades sostenibles, trabajo decente y acción climática.

La Tabla 4.24 muestra cómo el SDC ha generado impactos positivos en diferentes actores sociales: trabajadores, comunidad local, sociedad en general y consumidores. En el caso de los trabajadores, se promovió la igualdad de género mediante formación específica a mujeres cabeza de familia. En la comunidad local, se fomentó la creación de empleo, la participación comunitaria y el acceso sostenible a recursos, alineándose con políticas de economía circular. A nivel de sociedad, el SDC contribuyó a reducir emisiones de GEI, generó empleos y fortaleció la transferencia tecnológica para replicabilidad en otros contextos. Por último, para los consumidores, el compost producido benefició a cientos de hogares y permitió fertilizar superficies agrícolas locales, promoviendo responsabilidad ambiental al final del ciclo de vida de los productos. Este análisis evidencia la contribución del proyecto a varios ODS, incluyendo igualdad de género (ODS 5), trabajo decente (ODS 8), ciudades sostenibles (ODS 11), producción y consumo responsable (ODS 12) y acción climática (ODS 13).

Además de los indicadores presentados, la Tabla destaca a los actores involucrados en el proyecto y su relación con los distintos impactos: trabajadores, comunidad local, sociedad en general y consumidores. Cada actor desempeña un papel específico en la generación de beneficios sociales, ambientales y económicos. Por ejemplo, los trabajadores recibieron formación y oportunidades equitativas; la comunidad local se benefició de empleos y actividades de participación; la sociedad en general experimentó mejoras ambientales, transferencia de tecnología y generación de empleo; mientras que los consumidores accedieron al compost generado, fomentando así prácticas de economía circular. Este análisis integral subraya cómo los distintos actores contribuyen colectivamente a los ODS, reforzando la sostenibilidad y resiliencia del modelo implementado.

Tabla 4.24. Indicadores de participación y cohesión social

ACTORES	CATEGORIA DE IMPACTO	DEFINICIÓN	INDICADOR
Trabajadores	Igualdad y no discriminación	Todo el mundo merece una «oportunidad justa». No importa el sexo, la raza o la edad. Todo el mundo tiene derecho a ser tratado de forma justa y a acceder a las mismas oportunidades.	Formación dirigida a 6 mujeres cabeza de familia en los procesos de compostaje comunitario descentralizado, así como en la operación y mantenimiento de los compostadores.
Comunidad local	Creación de empleos locales	Fomentar el desarrollo de la comunidad local mediante la formación de los empleados locales en habilidades técnicas y transferibles.	Durante la ejecución del SDC, se llevaron a cabo 4 cursos de formación para el personal de la administración pública en relación con las estrategias de gestión de residuos y el funcionamiento, mantenimiento y supervisión de los compostadores instalados.
	Participación comunitaria	Las organizaciones deberían tener en cuenta a estas partes interesadas en el desarrollo y la implementación de políticas empresariales, especialmente aquellas que afectan al medio ambiente, la salud y el bienestar locales.	Se desarrolló e implementó un plan documento a nivel municipal cuyo marco de gestión tiene en cuenta la recolección puerta a puerta y el tratamiento de la materia organica mediante compostaje comunitario descentralizado como única vía de tratamiento para la materia orgánica.
			Se realizaron cerca de 11 actividades de participación ciudadana
	Acceso a los recursos materiales	Esto incluye la atención de la dirección al uso sostenible de los recursos naturales, la prevención de la contaminación y el reciclaje de residuos.	El SDC contribuye a la politica europea circular 851/218que establece entre otros la separación en la fuente de los bioresiduos y/o su tratamiento in-situ. Para un tratamiento por fracciones de 330 tn/añ, de las cuales 90 tn (28% del total) corresponden a la materia organica tratada in situ, mediante SDC.

Tabla 4.24. Indicadores de participación y cohesión social. Continuación

ACTORES	CATEGORIA DE IMPACTO	DEFINICIÓN	INDICADOR
Sociedad en General	Compromiso público con las cuestiones de sostenibilidad	Los compromisos se refieren a la contribución de las organizaciones al desarrollo sostenible de la comunidad o la sociedad, como la reducción del impacto de sus actividades.	A través del SDC, las emisiones se redujeron de +8,8 tCO ₂ eq/año a -0,9 tCO ₂ eq/año. Los créditos medioambientales superan ahora las emisiones, gracias a la mejora de la separación en origen y a una mejor recuperación de las fracciones secas.
	Desarrollo tecnológico	La transferencia de tecnología es el proceso de utilizar tecnología, conocimientos especializados, experiencia o instalaciones para un fin distinto al previsto originalmente por el país en desarrollo.	Esta investigación promueve su replicabilidad y Transferibilidad (R&T) en contextos similares en LMR, proporcionando directrices y un marco metodológico para cuantificar los aspectos económicos, operativos, medioambientales, sociales y legales con el fin de examinar la viabilidad de los proyectos SDC.
	Contribución al desarrollo económico	Contribuir al desarrollo económico del país de muchas maneras: generar ingresos, crear puestos de trabajo, proporcionar educación y formación, realizar inversiones o impulsar la investigación.	Durante la implementación del SCD, se generaron 10 empleos y 3 por el municipio para dar continuidad al SDC.
			Indicador de potencial de acceso o contribución ambiental per cápita, reconociendo que en la práctica su uso depende del interés individual: 30 t / 706 hab ≈ 42,5 kg/hab/año de compost disponible.
Consumidores	Responsabilidad fin de vida	En el ciclo de vida de un producto, el fin de su vida útil se refiere a su eliminación, reutilización o reciclaje. En un contexto medioambiental.	Número estimado de beneficiarios (suponiendo reparto promedio): Con uso promedio de 100 kg/año por hogar con 30 t/año, potencialmente se cubren 300 hogares
			En términos de superficie agrícola local (superficie/producción), la producción anual de compost permitiría fertilizar aproximadamente el 0,6 % de la superficie cultivada del municipio (3 ha de un total de 486 ha). Con una producción de 30 t/año y teniendo en cuenta la aplicación tecnica de referencia común de 10 t/ha, aproximadamente se están abonando 3 hectáreas al año.

Fuente: Elaboración propia a partir de Unep/Setac (2009)

Finalmente, la Figura 4.45 muestra la relación directa entre los impactos del proyecto y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando cómo el sistema de compostaje comunitario contribuye al ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico) mediante la creación de empleo verde; al ODS 5 (igualdad de género) a través de la participación de mujeres en procesos técnicos; al ODS 9 (innovación e infraestructura) promoviendo la transferencia tecnológica; al ODS 11 (ciudades sostenibles) mediante la mejora de la gestión de residuos; al ODS 12 (producción y consumo responsables) fomentando el reciclaje y la economía circular; al ODS 13 (acción climática) reduciendo emisiones; y al ODS 17 (alianzas) fortaleciendo redes locales e internacionales. Esta visualización refuerza cómo el proyecto articula transversalmente impactos sociales, económicos y ambientales alineados con la Agenda 2030, consolidando un modelo replicable de gestión sostenible de residuos.

Para garantizar la continuidad de los impactos sociales identificados, resulta esencial mantener determinadas condiciones habilitadoras: la estabilidad del personal técnico, la continuidad de las actividades educativas, la actualización de la infraestructura y la integración del sistema en la planificación municipal de residuos. Estos factores son indispensables para sostener la cohesión comunitaria, evitar la pérdida de capital social generado y asegurar que los beneficios sociales del SDC se consoliden en el largo plazo.

En síntesis, los resultados sociales demuestran la capacidad del modelo de compostaje descentralizado para fortalecer el tejido social local, generar empleo verde, impulsar la equidad de género y promover hábitos sostenibles. La participación de la comunidad fue clave para el éxito del proyecto, permitiendo su puesta en marcha y consolidación. Estos hallazgos contribuyen al debate académico sobre estrategias participativas de gestión de residuos y reafirman el potencial del sistema para replicarse en otros contextos territoriales con similares condiciones socioeconómicas y culturales. Además, la mecanización permitió mejorar las condiciones laborales, lo cual es clave no solo para dar continuidad al proyecto, sino también para dignificar la labor de los trabajadores implicados en la operación del sistema de compostaje.

Los resultados sociales se articulan directamente con los hallazgos ambientales y económicos del estudio. La reducción neta de emisiones identificada en el ACV contribuye a explicar la elevada percepción de sostenibilidad del sistema. Asimismo, la

creación de empleo verde se alinea con los resultados del análisis tecnoeconómico, que muestran la eficiencia del modelo descentralizado frente a alternativas centralizadas al internalizar beneficios comunitarios. Esta integración evidencia que los impactos sociales no son un componente aislado, sino un pilar estructural para la viabilidad del SDC a largo plazo.



Figura 4.45. Contribuciones del SCD a los ODS. Fuente: Elaboración propia a partir Unep/ Setac, (2009)

CAPÍTULO IV. SECCIÓN 3

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)



CAPÍTULO IV. SECCIÓN 3

**EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)**

El presente capítulo expone los resultados del análisis ambiental aplicado a los sistemas de gestión de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) evaluados en esta investigación. El enfoque se basó en la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), utilizando como categoría de impacto el Potencial de Calentamiento Global (GWP100) expresado en toneladas de CO₂ equivalente. La selección de esta categoría se fundamenta en su relevancia climática, su aplicabilidad en contextos de residuos orgánicos y su reconocimiento en estudios previos como indicador dominante de impacto (Colón *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2020; Serafini *et al.*, 2023).

A partir de una unidad funcional común —el tratamiento de 1 tonelada de FORM— se presentan los resultados diferenciados para los dos modelos de gestión analizados: el sistema centralizado (SCC) y el sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC). Se detallan las emisiones directas e indirectas generadas en cada fase del tratamiento, así como los impactos evitados atribuibles a la valorización del compost. Además, se discuten los puntos críticos (hotspots), las diferencias operativas entre los sistemas, y se analizan los beneficios ambientales colaterales vinculados a la mejora en la separación en origen, el cambio en la recolección y la eficiencia material del modelo descentralizado.

Este capítulo proporciona así una visión integral del comportamiento climático de ambos sistemas, aportando evidencia para la toma de decisiones orientadas a la descarbonización local de la gestión de residuos, en el marco de estrategias de economía circular y transición ecológica.

4.3. OBJETIVO ALCANCE Y UNIDAD FUNCIONAL

El objetivo de este análisis de ciclo de vida (ACV) es estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (expresadas en toneladas de CO₂ equivalente) asociadas a las etapas de recolección, tratamiento y disposición final de la fracción orgánica de los residuos

municipales (FORM) generada en el municipio de Les Masies de Roda.El estudio emplea como unidad funcional 1 t FORM y considera tanto las emisiones directas (como CH₄, N₂O y CO₂ de origen fósil) como los créditos ambientales derivados del aprovechamiento de subproductos, como el compost.

Alcance: El análisis se enfoca en comparar dos sistemas tecnológicos de gestión para la FORM:

- El Sistema Centralizado Convencional (SCC) y
- El Sistema Descentralizado de Compostaje Comunitario (SDC), implementado de manera local en el municipio.

El alcance cubre desde la recolección en origen, pasando por el transporte, tratamiento biológico (compostaje o tratamiento mecánico-biológico en el caso de la fracción mixta), hasta la disposición final de residuos rechazados y subproductos.Se incluyen los flujos energéticos (diésel y electricidad), las emisiones biológicas directas (metano, óxidos de nitrógeno), así como los impactos evitados por la sustitución de productos químicos agrícolas mediante el uso del compost.

Esta comparación permitirá determinar el balance neto de emisiones de CO₂ equivalente por tonelada de FORM gestionada, y evaluar el potencial beneficio ambiental de adoptar un modelo descentralizado como vía principal de tratamiento de la fracción orgánica.

Unidad funcional y Flujos: La unidad funcional definida para este estudio es el tratamiento de 1 t de fracción orgánica municipal (FORM), dado que es la fracción directamente implicada en el cambio tecnológico evaluado: la transición desde un sistema centralizado convencional (SCC) hacia un sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC). Aunque la implementación del SDC coincidió con mejoras en la separación en la fuente de otras fracciones del residuo municipal —lo que permitió incrementar su aprovechamiento y reducir el rechazo enviado a vertedero— estos cambios no alteraron de manera relevante sus procesos de tratamiento ni de disposición final. En consecuencia, el análisis de ciclo de vida se centra exclusivamente en la FORM y en la comparación de los sistemas de compostaje, mientras que las fracciones no orgánicas (multiproducto, vidrio y fracción resto) se consideran

únicamente como elementos contextuales del sistema municipal y se excluyen del inventario y del análisis comparativo principal.

Entradas y salidas del sistema: A continuación, se describen los principales flujos de entrada y salida considerados en el inventario del sistema, clasificados según su función en los procesos de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de la FORM. Esta clasificación permite identificar los recursos consumidos (energía, materiales), las emisiones generadas (gases de efecto invernadero y otros contaminantes), y los productos valorizables (como el compost).

Los mismos tipos de flujos se consideran tanto para el sistema centralizado como para el descentralizado, respetando los límites definidos del sistema y garantizando coherencia metodológica entre escenarios. La Tabla 4.25 correspondiente sintetiza el contenido, unidad de medida y función ambiental de cada flujo en relación con la unidad funcional establecida.

Tabla 4.25. Relación de entradas y salidas de los elementos considerados

Tipo de flujo	Elemento considerado	Descripción
Entrada	Fracción húmeda (FORM)	Materia orgánica biodegradable: restos de alimentos, vegetales, poda menor separada en la fuente. Contenido en contenedor marrón.
	Fracción seca (FORM en mixtos)	Materia orgánica biodegradable: restos de alimentos, vegetales, poda menor mezclada con residuos aprovechables y no aprovechables contenido en contenedor gris
	Energía - Combustible	Diesel utilizado en vehículos de recolección, y transporte
	Energía - Electricidad	Electricidad consumida en plantas de tratamiento o maquinaria auxiliar
Salida	Compost	Producto valorizado, usado como enmienda orgánica (SCC y SCD)
	Emisiones de GEI	Emisiones directas de CH ₄ , CO ₂ fósil y N ₂ O; indirectas por transporte y energía
	Emisiones evitadas	Por sustitución de fertilizantes minerales y gestión local descentralizada
	Rechazos / pérdidas	Fracción de residuos no tratados y enviados a disposición final

4.3.1. Límites del sistema y procesos considerados

Los límites del sistema han sido definidos de acuerdo con la norma ISO 14044, e incluyen únicamente los procesos relevantes para el análisis comparativo entre el sistema centralizado convencional (SCC) y el sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC), con base en la fracción orgánica como flujo funcional. El análisis se ha realizado bajo un enfoque «gate-to-grave», con un corte en la etapa de producción del compost. Las etapas posteriores como el transporte y aplicación agrícola no se modelan explícitamente. No obstante, se incorpora un crédito ambiental por la sustitución de fertilizantes sintéticos, de acuerdo con las prácticas establecidas de modelado por sustitución en ACV.

Comprende desde la recogida de la fracción orgánica hasta la obtención del compost como producto valorizado, incluyendo las emisiones asociadas al tratamiento y los créditos ambientales por sustitución de fertilizante mineral, por lo que el sistema se cierra en el punto de salida del compost como producto valorizado.

Quedan explícitamente excluidos de los límites del sistema los procesos relacionados con la extracción de materias primas, la fabricación y distribución de productos y equipos (infraestructura, maquinaria, contenedores) y la etapa de uso o aplicación del compost en destino final, en coherencia con la metodología establecida por la ARC (2023) y las directrices del GHG Protocol. Ambos sistemas (SCC y SDC) se modelan de forma paralela, permitiendo evaluar de manera comparativa los impactos netos asociados al tratamiento de una tonelada de fracción orgánica (unidad funcional), lo cual constituye el eje central de este estudio.

La Figura 4.46 representa los límites del sistema definidos para el análisis de huella de carbono del tratamiento centralizado de la fracción orgánica municipal (FORM) en el municipio de Les Masies de Roda, considerando como sistema de recogida la modalidad de acera para todas las fracciones.

El esquema incluye los procesos directamente vinculados al manejo de 1 tonelada de FORM, que constituye la unidad funcional del estudio. Se contemplan las etapas de recogida intramunicipal, compactación, transporte hasta la planta de tratamiento mecánico-biológico (TMB), el proceso de tratamiento mecánico biológico en dicha instalación (que incluye la fracción orgánica procedente de residuos mezclados),

así como la disposición final de los rechazos generados y la valoración del compost producido. Las **entradas energéticas** (diésel, electricidad) necesarias para la operación del sistema,

- Las emisiones directas generadas durante el proceso de compostaje (CH_4 , N_2O , CO_2 fósil, NH_3), y
- Crédito ambiental por la sustitución potencial de fertilizantes sintéticos, como resultado del uso agronómico del compost producido.

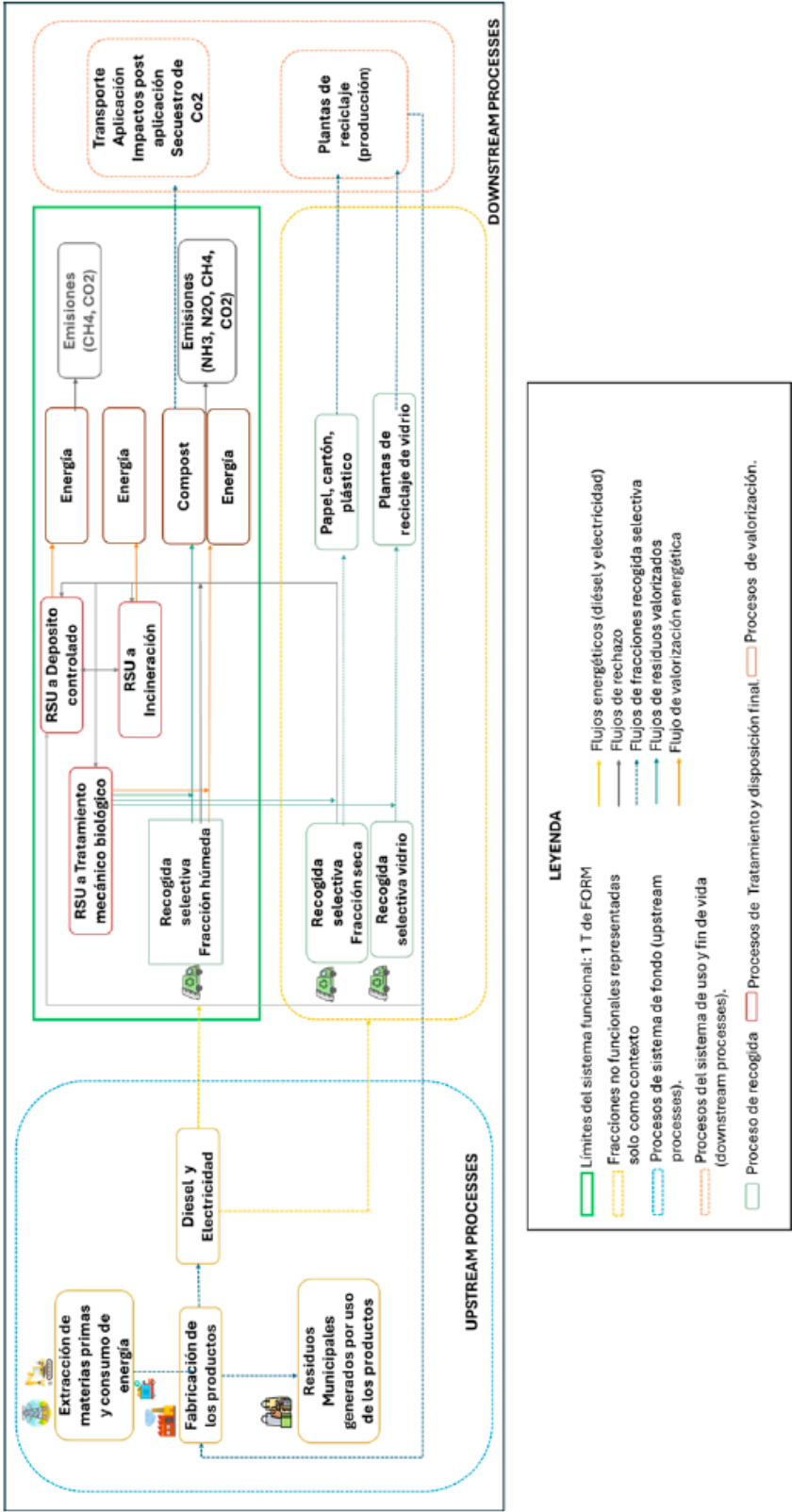


Figura 4.46. Límites del sistema: Tratamiento de materia orgánica mediante el SCC. Fuente: Elaboración propia

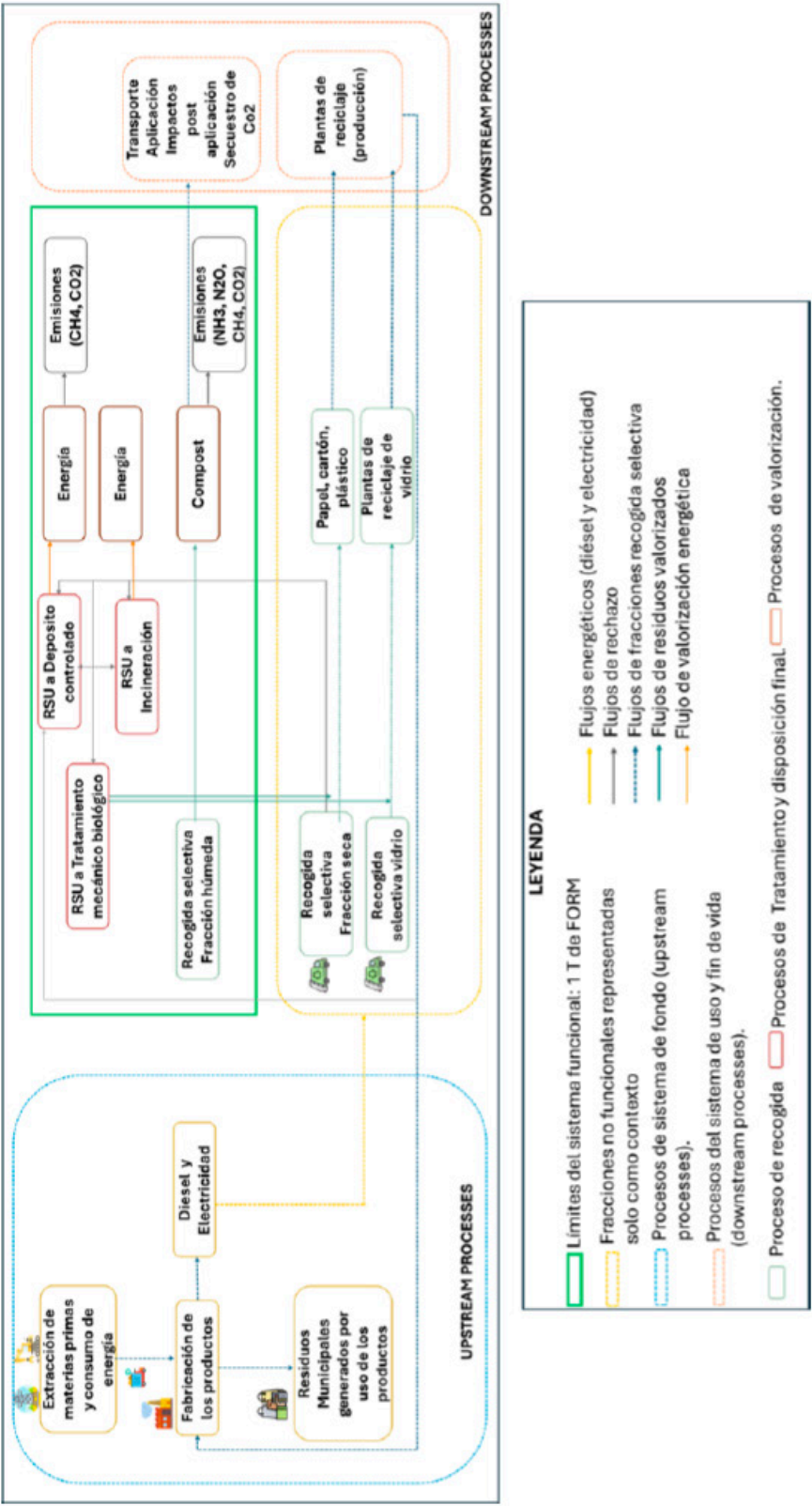


Figura 4.47. Límites del sistema: Tratamiento de materia orgánica mediante el Compostaje Descentralizado.
*Transporte y aplicación del compost, Proceso no modelado: mostrado como flujo teórico asociado al crédito. Fuente: Elaboración propia

En el esquema descentralizado de compostaje comunitario, no existe un sistema de recolección convencional, dado que los usuarios depositan directamente la FORM en los módulos de compostaje. Los límites del sistema incluyen las etapas de recepción, tratamiento biológico aeróbico, operaciones internas mecanizadas (aireación, transporte de compostador a otro y transporte de compost al área de post-procesamiento) y la producción final de compost.

4.3.2. Inventario: entradas, salidas y supuestos metodológicos

Los impactos ambientales fueron calculados a partir de datos primarios recopilados directamente en el contexto local del estudio, complementados con datos secundarios obtenidos de fuentes reconocidas, tales como la base de datos Ecoinvent, el IPCC (2019), ARC (2023) y literatura científica especializada en análisis de huella de carbono aplicada a la gestión de residuos municipales. La relación detallada de los datos empleados, clasificados como primarios o secundarios, junto con sus respectivas fuentes, se presenta en la Tabla 4.27 y 4.28.

Supuestos SCC: En esta sección se detallan los principales supuestos que fundamentan la delimitación del sistema, los parámetros técnicos y las decisiones metodológicas adoptadas:

Ponderación por tecnologías de tratamiento de la FORM: Con el objetivo de reflejar con mayor precisión la realidad operativa del sistema de gestión de residuos, se adoptó un enfoque de agregación ponderada para la estimación de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) asociadas al tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM). Esta metodología considera que una tonelada de FORM puede ser gestionada mediante distintas tecnologías, cada una con un perfil de impacto ambiental diferenciado.

Del total de la FORM gestionada, se asumió que el 54 % de la FORM es tratada mediante compostaje aeróbico, el 39 % mediante tratamiento mecánico-biológico (TMB) y el 7 % restante mediante disposición final en relleno sanitario. proporciones que corresponden a los resultados de las caracterizaciones realizadas por la ARC (2021) Con base en estas proporciones, se calculó una emisión ponderada de CO₂ eq por tonelada de FORM tratada, aplicando la siguiente expresión:

$$Emision\ total\ (CO_2) = \sum_i (Fracción_i \times Emisión_i)$$

Este enfoque está respaldado por la revisión sistemática realizada por Serafini *et al.* (2023), donde se identifican múltiples estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que aplican metodologías comparables para integrar tecnologías múltiples dentro de un mismo sistema funcional. Además, se encuentra en concordancia con los principios metodológicos establecidos en la norma ISO 14044, en lo relativo a la interpretación de resultados mediante escenarios agregados y representativos del flujo real de residuos.

Consumos energéticos SCC: Consumos Diesel por compactación: Según Larsen, A. (2009) y Teixeira, C. (2014), muestran un consumo total de 1.4–10.1 L/t para recolección, de los cuales entre el 15 % y el 25 % corresponde a compactación. Al aplicar estos porcentajes al consumo promedio de 3.96 L/t (Porto, 2014), se estima un consumo específico de compactación de entre 0.6 y 1.0 L/t, lo cual coincide con el valor asumido en este estudio (0.5 L/t).

Dado que no se dispone de valores desagregados específicos sobre el consumo energético asociado exclusivamente a la separación de la fracción orgánica en mezclas en sistemas TMB, se aplicó una estimación proporcional basada en estudios europeos (JRC, 2011). Estos estudios indican que las operaciones de pretratamiento y clasificación mecánica representan típicamente entre el 20 % y el 30 % del consumo energético total del sistema. En este estudio, se adoptó un valor conservador del 20 %, lo cual, sobre un consumo total reportado de 770 MJ/t, permite estimar un consumo de 154 MJ/t para la separación de FORM, valor incluido en el inventario de emisiones.

4.3.3. Factores de emisión y caracterización

Con el objetivo de asegurar la coherencia metodológica y representatividad contextual en la estimación de la huella de carbono, se tomó como referencia la generación promedio de residuos orgánicos correspondiente al quinquenio anterior a 2018. Esta delimitación temporal se justificó en función de las alteraciones observadas en los años posteriores, asociadas a un fenómeno de ingreso irregular de residuos externos a la localidad de LMR, comúnmente referido como *turismo de residuos*. Dicho fenómeno

provocó un aumento significativo y no atribuible a fuentes locales en los volúmenes de residuos gestionados, comprometiendo así la validez de los datos para reflejar las dinámicas reales de generación del territorio en estudio. En consecuencia, se aplicó un procedimiento de ponderación a los factores de emisión vinculados al componente energético, considerando exclusivamente los años anteriores al inicio de este fenómeno. Esta ponderación se realizó en función del volumen de residuos orgánicos generados por año, permitiendo así obtener un factor de emisión energético compuesto, más robusto y representativo de la situación base de LMR antes de la implementación del modelo de compostaje descentralizado. Este enfoque metodológico permitió reducir el sesgo potencial en los resultados de huella de carbono atribuibles a distorsiones estructurales en la generación de residuos durante el período de transición.

Proceso de compostaje: Según, Boldrin *et al.* (2009.) Durante el tratamiento biológico de la FORM, entre 35 % y 60 % de la masa húmeda puede perderse en forma de CO₂ biogénico y vapor de agua.

Diversas fuentes señalan que el rendimiento en masa del compost obtenido mediante procesos aeróbicos oscila entre el 25 % y el 35 % de la materia orgánica tratada, siendo el valor del 30 % una referencia ampliamente utilizada en estudios de compostaje a escala municipal (Haug, 1993; Boldrin *et al.*, 2009)

Factores de emisión de CH₄ y N₂O en compostaje aerobio: En este estudio se utilizaron diferentes factores de emisión de CH₄ y N₂O para compostaje aeróbico en función del tipo de sistema analizado. Para el compostaje centralizado se aplicaron los valores provistos por la herramienta CarbonFootprint_Calculator_MSW (0.15 kg CH₄/t; 0.085 kg N₂O/t), los cuales se sitúan en el rango inferior del intervalo publicado por el IPCC (2006) y representan sistemas profesionalizados con aireación activa, volteo mecánico y biofiltros, donde las emisiones tienden a ser menores.

En cambio, para el compostaje descentralizado se adoptaron valores empíricos de la literatura reportados por Colón *et al.* (2012) (0.20 kg CH₄/t; 0.30 kg N₂O/t), que provienen de mediciones experimentales en sistemas comunitarios o domésticos. Estos valores se ubican dentro del rango del IPCC, aunque más cercanos al valor medio-alto en el caso del N₂O, reflejando las características de sistemas menos controlados, donde la falta de uniformidad en aireación, humedad y manejo de nitrógeno puede favorecer la formación de emisiones adicionales.

La diferenciación entre ambos conjuntos de factores permite ajustar la cuantificación de emisiones a las condiciones reales de cada tipo de compostaje, manteniendo coherencia científica y metodológica, y evitando tanto la sobreestimación como la subestimación de impactos.

Tabla 4.26. Factores de emisión de CH₄ y N₂O en compostaje aeróbico (kg/t FORM)

Fuente	CH ₄ (kg/t)	N ₂ O (kg/t)	Notas
IPCC (2006) – Rango general	0.03 – 8.0	0.06 – 0.6	Rango amplio que refleja variabilidad según gestión, humedad, aireación y C/N.
CarbonFootprint_Calculator_MSW (centralizado)	0.15	0.085	Valores situados en el extremo inferior del rango IPCC, representativos de sistemas bien gestionados, con aireación forzada, volteo mecánico y biofiltros.
Colón et al. (2012) (descentralizado)	0.16	0.6	Valores empíricos experimentales de sistemas comunitarios/home composting. Coherentes con condiciones de menor control operativo, que generan más emisiones de N ₂ O.

Fuente: Elaboración propia a partir de: (IPCC 2006-2019; Centro tecnológico Beta 2019; Colon et al 2012)

Emisiones evitadas: Si bien diversas fuentes científicas e institucionales han estimado el potencial de emisiones evitadas por la valorización del compost en suelos agrícolas, dichos valores suelen representar beneficios netos que incluyen tanto el efecto por la sustitución de fertilizantes minerales (N, P, K) como las emisiones derivadas del transporte y aplicación del compost en campo. En el estudio de Colón *et al.* (2010), reporta un rango de 150 a 250 kg CO₂ eq por tonelada de compost aplicado, considerando los contenidos nutricionales del compost doméstico y los impactos asociados a su uso. Por su parte, Rigamonti *et al.* (2010) cuantifican el beneficio neto en 206 kg CO₂ eq/t, incorporando también las emisiones por distribución y aplicación agronómica. A nivel institucional, la ARC (2011) estima un rango de 148 a 257 kg CO₂ eq/t, con un valor medio de 191 kg CO₂ eq/t, también bajo un enfoque de análisis de ciclo de vida completo.

No obstante, en el presente análisis se asumió un valor conservador de 150 kg CO₂ eq/t, excluyendo explícitamente las emisiones derivadas del transporte y la aplicación del compost. Esta cifra representa el límite inferior validado por la literatura para el beneficio atribuible exclusivamente a la sustitución de insumos sintéticos, y permite mantener la coherencia con los límites del sistema definidos para este estudio.

Tratamiento mecánico biológico: El sistema de compostaje evaluado corresponde a un proceso in-vessel. La tecnología utilizada para el tratamiento de la fracción orgánica separada en la fuente y tratamiento mecánico biológico consiste en sistemas de volteo mecanizado en nave cerrada, tecnología BioMax Sorain Cecchini Tecno. Según Hyder Consulting (2011).

Para el inventario del sistema centralizado, se asumió lo reportado por el centro de tratamiento de Osona y Ripolles, Oris donde el rechazo no aprovechable presenta un contenido de materia orgánica inferior al 15 %. Este porcentaje se aplicó únicamente al flujo tratado en el TMB, con el fin de representar la eficiencia interna de separación del proceso.

Inventario y balance de masas: En el presente análisis de ciclo de vida (ACV), se estimó un balance de masas para el tratamiento de la fracción orgánica municipal (FORM) considerando como principales emisiones gaseosas los compuestos de efecto invernadero directamente asociados al potencial de calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), de acuerdo con las directrices del IPCC (2006, 2019 Refinement).

En ausencia de datos primarios sobre emisiones de compuestos acidificantes y tóxicos, se ha estimado la liberación de NH_3 , NO_x y SO_2 a partir de factores representativos de literatura técnica (IPCC, 2019; EEA, 2022; Ecoinvent v3.8), considerando un escenario medio de compostaje. Estos compuestos no se incluyen en el cálculo de huella de carbono, pero se contabilizan en el balance de masa total.

En el balance de masa para el compostaje descentralizado, se estimó la emisión de amoníaco (NH_3) a partir de la diferencia entre el contenido de nitrógeno total en la fracción orgánica de entrada y el compost resultante. Considerando que aproximadamente el 60–80 % del nitrógeno no retenido puede volatilizarse como NH_3 (Amlinger *et al.*, 2008; IPCC, 2006), se ha adoptado un valor de 0.84 kg NH_3 /t FORM para representar esta pérdida gaseosa en el inventario.

4.3.4. Cálculo de emisiones directas e indirectas

En coherencia con los límites del sistema establecidos en este estudio, se diferenciaron las emisiones directas e indirectas según su origen y ubicación respecto al sistema evaluado. Las emisiones directas (alcance 1) incluyen tanto las derivadas de la combustión del diésel, utilizada en maquinaria interna, como las emisiones inherentes al proceso biológico de compostaje, tales como metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), que se generan durante la degradación aerobia de la fracción orgánica. Esta clasificación se fundamenta en el GHG Protocol – Corporate Standard y en la norma ISO 14064-1:2018, que consideran como directas todas las emisiones generadas dentro de instalaciones o procesos bajo control del operador, incluyendo la combustión interna y los procesos biológicos.

Por otro lado, las emisiones indirectas (alcance 2) comprenden aquellas asociadas al consumo de electricidad proveniente de la red, cuya generación se realiza fuera del límite operativo del sistema. Estas emisiones se estimaron a partir del consumo eléctrico específico de cada sistema y los factores de emisión anuales del mix eléctrico nacional, publicados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO 2025). En el caso del diésel, si bien se trata de un insumo externo, las etapas de extracción, refinado y distribución del combustible no fueron consideradas dentro de los límites del sistema; por tanto, las emisiones indirectas asociadas a la cadena de suministro del diésel no fueron incluidas. El cálculo se restringió únicamente a las emisiones directas de combustión, también determinadas según los factores oficiales publicados por MITECO para cada año evaluado.

Tabla 4.27. Inventario realizado para el SCC, clasificados como primarios o secundarios, junto con sus respectivas fuentes. Unidad funcional: 1 t de FORM tratada

TIPO	PROCESO	FLUJO	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCION	FUENTE	TIPO
ENTRADAS	RECOLECCION Y TRANSPORTE	Diesel	0.5	L	Consumo por compactación	Larsen, A. 2009, Teixeira, C. A 2014, Porto. 2014	Secundario
		Diesel	0.375	L	Consumo camión compactador intraciudad	Ecoinvent V. 3.8 2021	Secundario
		Diesel	0.04	L	Consumo camión compactador a planta de tratamiento	Ecoinvent V. 3.8 2021	Secundario
	COMPOSTAJE AEROBIO	Diesel	2.66	L	Consumo maquinaria en el proceso	Colon et al 2015	Secundario
		Electricidad	770	MJ	Consumo maquinaria en el proceso	Colon et al 2012	Secundario
SALIDAS	SEPARACION	Electricidad	154	MJ	Consumo maquinaria en el proceso	JRC Scientific and Technical Reports 2011	Secundario
	RECOLECCION Y TRANSPORTE	CO2 fósil	2.58	Kg CO ₂	Factor de Emisión por consumo de diesel en vehículo	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico	Secundario
		Transporte	17	tkm	Recoleccion intraciudad	Datos en campo	Primario
		Transporte	16	tkm	Transporte a planta	Datos en campo	Primario

Tabla 4.27. Inventario realizado para el SCC, clasificados como primarios o secundarios, junto con sus respectivas fuentes. Unidad funcional: 1 t de FORM tratada. Continuación

TIPO	PROCESO	FLUJO	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCION	FUENTE	TIPO
SALIDAS	COMPOSTAJE AEROBIO	CO2 fósil	2.56	Kg CO ₂	Factor de emisión por consumo de diesel de maquinaria en el proceso	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico	Secundario
		CO2 fósil	0.11	Kg CO ₂	Factor de emisión por consumo de mix eléctrico de maquinaria en el proceso	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico	Secundario
		CH4	0.15	kg	Factor de emisión de compostaje aerobio In-vessel	Colon et al 2010, Amlinger et al 2008	Secundario
		N2O	0.085	kg	Factor de emisión de compostaje aerobio In-vessel	Colon et al 2010, Amlinger et al 2008	Secundario
		COMPOST	300	kg	Compost obtenido a partir de 1 tn de materia orgánica	Haug, 1993; Boldrin et al., 2009	Secundario
	SEPARACION	COMPOST	-150	Kg CO ₂	Factor de emisión evitado por sustitución de fertilizante químico	Colon et al 2010, Rigamonti 2010, Agencia de Residuos 2011	Secundario
		CO2 fósil	0.11	Kg CO ₂	Factor de emisión por consumo de mix eléctrico de maquinaria en el proceso	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico	Secundario
		CH4	0.012	kg	Factor de emisión de metano en relleno sanitario	IPCC Guidelines 2006, Volumen 5: Solid Waste Disposal Sites	Secundario
	DISPOSICION FINAL						

* GWP100 (IPCC AR5); Factor de caracterización GWP100 (IPCC AR5)-Potencial con calentamiento global: GWP de CH₄ (100 años) = 28 kg CO₂ eq/kg; GWP de N₂O (100 años) = 265 kg CO₂ eq/kg (IPCC AR5, 2014)

Tabla 4.28. Inventario realizado para el SDC, clasificados como primarios o secundarios, junto con sus respectivas fuentes.
Unidad funcional: 1 t de FORM tratada

TIPO	PROCESO	FLUJO	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCION	FUENTE	TIPO
ENTRADAS	MANTENIMIENTO COMPOSTADORES FORM SEPARADA	Diesel	14.8	L	Consumo camión con mezcladora	Datos en campo	Primario
	POST-PROCESAMIENTO	Electricidad	0.30	MJ/t	Consumo trómel	Datos en campo	Primario
		Transporte	17	tkm	Recolección intraciudad	Datos en campo	Primario
SALIDAS	MANTENIMIENTO COMPOSTAJE COMUNITARIO AEROBIO	CO2 fósil	2.52	Kg CO ₂	Factor de Emisión por consumo de diésel en vehículo	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico 2021	Secundario
		CH4	0.16	kg	Factor de emisión de compostaje casero aerobio	Colon et al 2010, Amlinger et al 2008	Secundario
		N2O	0.6	kg	Factor de emisión de compostaje casero aerobio	Colon et al 2010, Amlinger et al 2008	Secundario

Tabla 4.28. Inventario realizado para el SDC, clasificados como primarios o secundarios, junto con sus respectivas fuentes. *Continuación*
Unidad funcional: 1 t de FORM tratada

TIPO	PROCESO	FLUJO	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCION	FUENTE	TIPO
SALIDAS	MANTENIMIENTO COMPOSTAJE COMUNITARIO AEROBIO	COMPOST	300	kg	Compost obtenido a partir de 1 tn de materia orgánica	Haug, 1993; Boldrin et al., 2009	Secundario
		COMPOST	-150	Kg CO ₂	Factor de emisión evitado por sustitución de fertilizante químico	Colon et al 2010, Rigamonti 2010, Agencia de Residuos 2011	Secundario
		CO2 fósil	0.07	Kg CO ₂	Factor de emisión por consumo de mix eléctrico de maquinaria en el proceso	Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico 2021	Secundario

* GWP100 (IPCC AR5): Factor de caracterización GWP100 (IPCC AR5)-Potencial con calentamiento global: GWP de CH₄ (100 años) = 28 kg CO₂ eq/kg; GWP de N₂O (100 años) = 265 kg CO₂ eq/kg (IPCC AR5, 2014)

4.3.5. Metodología de evaluación de impacto (GWP100)

Este estudio utiliza un Análisis de Ciclo de Vida enfocado exclusivamente en la categoría de impacto Cambio Climático (GWP100, kg CO₂-eq), siguiendo la metodología del IPCC 2019 con un horizonte de 100 años. Usando factores de caracterización para CH₄, N₂O y CO₂. Esto corresponde al Potencial de Calentamiento Global a 100 años (GWP100). Esta elección se justifica por ser la categoría dominante en la mayoría de los estudios previos sobre gestión de residuos orgánicos (Bernstad *et al.*, 2012), y por su relevancia para las políticas de mitigación climática. No se consideran otras categorías como eutrofización o uso del suelo, lo que constituye una limitación metodológica reconocida que podrá abordarse en trabajos futuros.

Software de evaluación de impacto: Para calcular las toneladas de CO₂ eq, se tienen en cuenta como información de entrada los porcentajes de cada una de las fracciones destinadas a los diferentes tipos de tratamiento (mecánico biológico, compostaje anaerobio, compostaje aerobio y vertedero), así como la información relacionada con el transporte de estas. Además, se tiene en cuenta el flujo de la materia orgánica separada en la fuente y contenida en mixtos, de acuerdo con las caracterizaciones de la Agencia de residuos y la estadística de datos presentados para los años con SCC y SCD, así como las propiedades de cada una de las fracciones que componen los RSU (% de humedad, % de C, % de Corg, % de degradabilidad, poder calorífico, etc.). El cálculo de la huella de carbono de la gestión municipal de residuos sólidos se realizó utilizando la herramienta CarbonFootprint_Calculator_MSW diseñada por el Centro Tecnológico BETA de la Universidad de Vic - Universidad Central de Cataluña. Esta herramienta tiene en cuenta las vías de gestión mencionadas anteriormente en la Tabla, lo que da como resultado el impacto de las toneladas de CO₂ emitidas, evitadas y netas y realizar su comparación entre sistemas (centralizado y descentralizado).

Selección de impactos de categorías: Para la evaluación del impacto ambiental, se seleccionó la categoría Cambio climático (expresada en t CO₂ eq), correspondiente al enfoque de categorías de impacto *midpoint*, de acuerdo con metodologías reconocidas en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como CML o IPCC. Esta categoría cuantifica el potencial de calentamiento global (GWP) asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), incluyendo dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), entre otros, durante todo el ciclo de tratamiento de la fracción

orgánica. La elección de esta categoría responde a su relevancia climática y a su uso extendido en estudios de gestión de residuos, permitiendo además la comparación con estándares internacionales.

4.3.6. Resultados del sistema centralizado (SCC)

4.3.6.1. Contexto operativo y caracterización del sistema

Previo a la implementación del sistema descentralizado de compostaje (SDC), el municipio operaba bajo un modelo de gestión centralizado basado en la recolección selectiva en acera y el transporte de todas las fracciones de residuos municipales a instalaciones externas para su tratamiento y valorización, con los residuos no recuperables destinados a disposición final en vertederos. Este modelo, vigente en el año 2019, presentaba limitaciones en la eficiencia de recuperación de la fracción orgánica contenida en los residuos mezclados.

Según datos oficiales reportados por la Agència de Residus de Catalunya, la generación anual de residuos municipales alcanzó las 331 toneladas, con una distribución en fracciones separadas de: orgánica (49 t), vidrio (32 t), multiproducto —plásticos, papel y cartón— (93 t), otras fracciones (43 t) y una fracción mixta residual de 107 t. Dentro de esta fracción mixta, según ARC. (2021), aproximadamente el 30 % (equivalente a 41 t/año) correspondía a materia orgánica (OFMSW). Esta fracción fue transportada a plantas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) bajo configuración centralizada (SCC), donde se logró valorizar 35 toneladas mediante estabilización biológica. No obstante, las 6 toneladas restantes de materia orgánica no valorizable fueron enviadas a vertedero, lo cual evidencia un desperdicio significativo de recursos valorizables y una ineficiencia estructural en la recuperación de biorresiduos bajo el modelo anterior.

4.3.6.2. Resultados de huella de carbono por tipo de tratamiento

Tal y como se puede observar en la Tabla 4.29, el sistema centralizado de tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) evaluado en este estudio arroja un balance neto de huella de carbono de 0.232 t CO₂ eq por tonelada de FORM tratada, resultado de la suma de emisiones directas (0.220 t CO₂ eq) e indirectas (0.057 t CO₂ eq), compensadas parcialmente por impactos evitados (-0.045 t CO₂ eq). Al

analizar cada vía de tratamiento por separado, se observa que el compostaje aeróbico asociado a la recogida selectiva presenta el menor impacto neto (0.034 t CO₂ eq/t), gracias a los beneficios ambientales derivados del uso del compost como sustituto parcial de fertilizantes minerales, los cuales permiten compensar las emisiones directas del proceso (0.032 t) y las indirectas vinculadas al consumo energético (0.044 t). En contraste, el tratamiento de FORM en mezclas mediante tecnología de tratamiento mecánico-biológico (TMB) muestra un impacto neto ligeramente superior (0.034 t CO₂ eq/t), sin aportes de emisiones evitadas, lo cual refleja la limitada valorización material del residuo en este escenario. Finalmente, el depósito controlado representa el tratamiento con mayor impacto climático (0.154 t CO₂ eq/t), concentrando la totalidad de sus emisiones en el componente directo, fundamentalmente por la generación de metano (CH₄), y sin ningún tipo de crédito ambiental asociado. Estos resultados confirman que el compostaje aeróbico, cuando está basado en recogida selectiva, constituye la opción ambientalmente más favorable dentro del sistema evaluado, mientras que el vertido controlado representa el punto crítico en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. El balance global del sistema sugiere que existen oportunidades claras de mejora ambiental mediante el aumento de la fracción recogida selectivamente y el fortalecimiento de estrategias de valorización orgánica frente a la eliminación en vertedero.

Tabla 4.29. Resultados expresados en t CO₂ eq por tratamiento del flujo de la materia orgánica mediante sistemas de compostaje centralizado

TRATAMIENTO	Resultados expresados en t CO2 eq			
	Impactos Directos (A)	Impactos indirectos (B)	Impactos evitados (C)	BALANCE NETO
Recogida selectiva Aerobio	0.032	0.044	- 0.05	0.031
Form en mixtos (TMB)	0.034	0.006	0.000	0.040
Depósito controlado	0.154	0.0067	- 4.x 10 ⁻⁶	0.160
Total	0.220	0.057	-0.05	0.232

4.3.6.3. Distribución de impactos: directos, indirectos y evitados

La Figura 4.48 muestra la distribución de los impactos directos (a) y los impactos indirectos (B), ambos expresados en términos relativos para cada vía de tratamiento.

Impactos directos (a):

Depósito controlado concentra el 70 % de las emisiones directas, lo que refleja su alta contribución al calentamiento global, especialmente por las emisiones de metano (CH₄) generadas en condiciones anaeróbicas del vertedero. Este resultado es consistente con la literatura, que identifica al vertido como una de las opciones con mayor intensidad climática.

El TMB (tratamiento de FORM en mezclas) aporta el 15 % restante, debido a las emisiones derivadas del procesamiento mecánico-biológico, aunque sin valorización de los productos estabilizados.

Recogida selectiva con compostaje aeróbico representa un 15 %, atribuible principalmente a las emisiones biogénicas de N₂O y CH₄ propias del proceso de descomposición de la materia orgánica. Esta distribución evidencia que, aunque el compostaje genera emisiones directas, su impacto es considerablemente menor en comparación con el vertido.

Impactos indirectos (b):

Recogida selectiva con tratamiento aerobio (77 %): s la vía con mayor contribución relativa a los impactos indirectos. Esto se debe a la logística intensiva asociada a la recogida en origen (vehículos adicionales, rutas diferenciadas y mayor consumo de combustible), junto con las infraestructuras específicas y consumos energéticos del tratamiento. Es importante señalar que estos impactos corresponden al conjunto del sistema (recogida + tratamiento), y no únicamente al proceso de compostaje.

FORM en mezclas tratada en TMB (11 %): Los impactos indirectos son menores, pero no despreciables. Surgen de una operación de la planta de tratamiento mecánico-biológico (electricidad, mantenimiento de equipos) y transporte de su desde su generación hasta la planta.

Depósito controlado (12 %): Sus impactos indirectos son relativamente bajos en comparación, porque los principales efectos se consideran impactos directos (emisiones de metano). Los indirectos provienen sobre todo de: consumo energético para extracción y gestión del biogás y transporte de los residuos hasta el depósito.

En síntesis, el depósito controlado domina claramente en emisiones directas, mientras que el compostaje aeróbico lidera en emisiones indirectas por consumo energético. Sin embargo, estas diferencias no se traducen directamente en peores resultados climáticos, ya que el compostaje compensa buena parte de sus impactos a través de los beneficios evitados por sustitución de fertilizantes. En cambio, el vertedero no genera beneficios ambientales compensatorios, lo que lo convierte en el principal contribuyente al impacto climático neto del sistema.

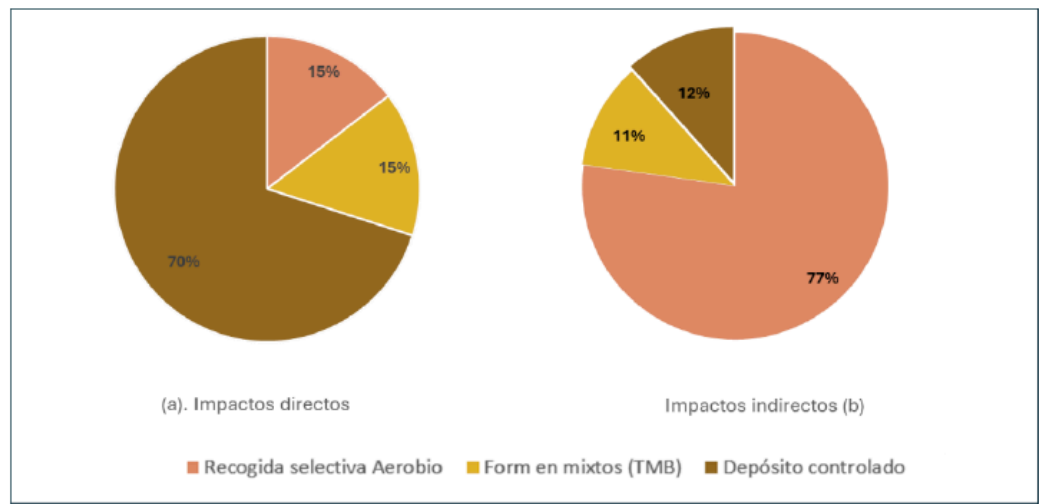


Figura 4.48. Distribución relativa de impactos de cambio climático por tipo de tratamiento. Recogida selectiva aerobio: Contribuye con un 15 % de los impactos directos y un 77 % de los impactos indirectos. FORM en mezcla tratada en TMB: Aporta un 15 % de los impactos directos y un 11 % de los impactos indirectos. Depósito controlado: Representa el 70 % de los impactos directos y un 12 % de los impactos indirectos.

4.3.6.4. Análisis de hotspots y oportunidades de mejora

El análisis de huella de carbono revela varios hotspots o puntos críticos en términos de contribución al cambio climático dentro del sistema centralizado de tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM). La Figura 4.48 presentada muestra claramente la distribución de impactos por vía de tratamiento, desglosando las emisiones directas, indirectas y los impactos evitados, expresados en toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de FORM tratada.

En primer lugar, el depósito controlado destaca como el principal hotspot climático del sistema, con un impacto neto de aproximadamente 0.160 t CO₂ eq/t FORM,

derivado exclusivamente de emisiones directas (principalmente CH₄), a pesar de sus impactos evitados por la producción de electricidad mediante el aprovechamiento de biogas. Esta ruta representa el mayor aporte al total de emisiones del sistema, evidenciando su baja eficiencia climática y el limitado retorno ambiental frente a las demás tecnologías.

Otro punto crítico se identifica en la vía de tratamiento mecánico-biológico (TMB) de FORM en mezclas. Aunque su impacto neto (0.040 t CO₂ eq/t) es menor que el del deposito, presenta una ausencia de impactos evitados, lo que indica una infrautilización de la fracción orgánica estabilizada y la carencia de valorización posterior. Además, las emisiones directas son relevantes, y aunque las emisiones indirectas son bajas (reflejadas en la Figura 4.49 por una barra de menor altura), esto no compensa la falta de beneficios ambientales.

En contraste, el compostaje aeróbico con recogida selectiva no solo presenta un balance neto más bajo (0.031 t CO₂ eq/t), sino que es la única vía que genera impactos evitados significativos (-0.05 t CO₂ eq/t), gracias al uso del compost como sustituto de fertilizantes minerales. En la gráfica, esto se refleja con una barra negativa amarilla que contrarresta visualmente las emisiones directas e indirectas, destacando su rol mitigador dentro del sistema.

No obstante, dentro de esta misma vía también se identifica un hotspot secundario en las emisiones indirectas, que representan la mayor fracción de emisiones en esta ruta (0.044 t CO₂ eq/t), lo cual sugiere un consumo energético elevado en las fases de operación (ventilación, volteo, tratamiento de gases), típico de sistemas de compostaje en nave cerrada o intensiva.

Estos resultados refuerzan la necesidad de avanzar hacia un modelo de tratamiento donde se reduzca la dependencia del vertedero, se maximice la valorización de la fracción orgánica recuperada y se optimicen energéticamente los sistemas de compostaje centralizado.

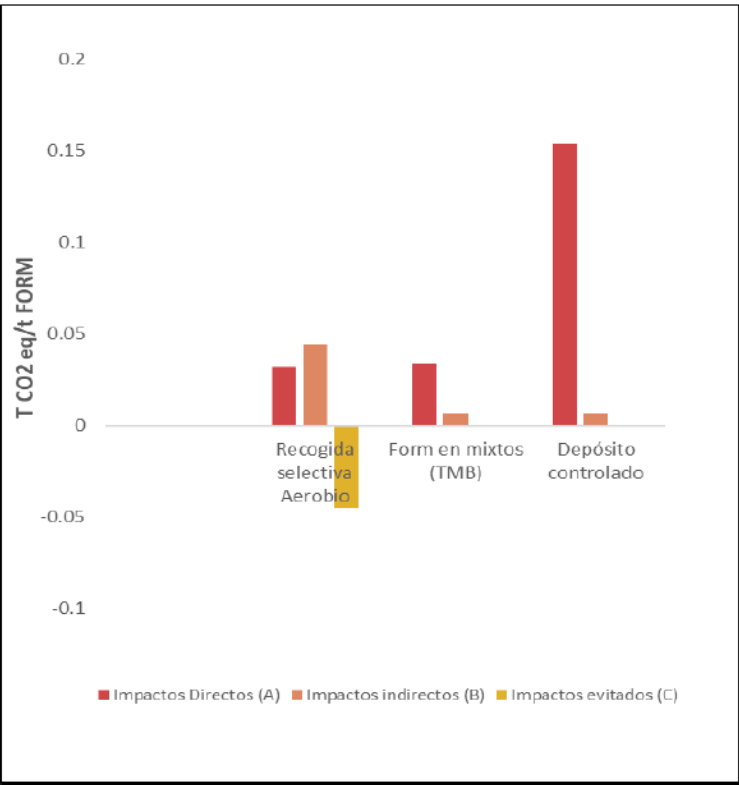


Figura 4.49. Impactos Directos, indirectos e impactos evitados. La Figura muestra la comparación de impactos directos (A), impactos indirectos (B) e impactos evitados (C) expresados en t CO₂ eq por tonelada de FORM gestionada, para tres vías de tratamiento: Recogida selectiva aerobio: presenta impactos directos e indirectos moderados, pero con la particularidad de generar impactos evitados negativos gracias a la sustitución de fertilizantes minerales por el compost producido; FORM en mezclas tratada en TMB: genera impactos directos e indirectos relativamente bajos, aunque sin beneficios significativos en términos de impactos evitados; Depósito controlado: concentra los mayores impactos directos debido a las emisiones de metano asociadas a la descomposición anaerobia en vertedero; los impactos indirectos son menores, y no se registran beneficios relevantes en impactos evitados. *Fuente: Elaboración propia*

4.3.6.5. Análisis de sensibilidad a la tasa de recuperación de metano en depósito controlado

Dado que el depósito controlado constituye el principal hotspot climático del sistema (≈0.160 t CO₂ eq/t FORM), resulta esencial precisar los supuestos sobre la tasa de recuperación de metano (CH₄), ya que este parámetro determina de manera crítica el balance de emisiones.

En este estudio se adoptó como escenario base el valor 11,6 %, medido en el depósito de Orís en 2017. Este porcentaje refleja condiciones reales de captación en Cataluña, pero es inferior al valor por defecto recomendado por el IPCC (20 %) y al supuesto aplicado por la ARC (30 %) en inventarios regionales. Para explorar esta incertidumbre, se ha realizado un análisis de sensibilidad ampliando la tasa de recuperación hasta escenarios de mejora: 40 %, 50 %, 60 % y 70 %, en línea con las referencias de buenas prácticas internacionales y con los escenarios de mejora proyectados por la Oficina Catalana de Canvi Climàtic.

La Figura 4.50 presenta la relación entre la tasa de recuperación de CH₄ y las emisiones netas (t CO₂ eq/t FORM). Se observa una tendencia clara y monotonía: las emisiones disminuyen progresivamente desde 0.160 t CO₂ eq/t FORM en el escenario de baja recuperación (11,6 %) hasta 0.052 t CO₂ eq/t FORM en el escenario óptimo de 70 %. Este resultado confirma que el grado de captación de metano es un parámetro altamente sensible, cuya mejora puede reducir las emisiones en más de un 65 % respecto al valor actual. Sin embargo, incluso bajo supuestos de alta recuperación, el depósito controlado sigue presentando un balance neto superior al compostaje aerobio, lo que refuerza la necesidad de priorizar el desvío de FORM fuera de vertedero conforme a la jerarquía de residuos de la Unión Europea.

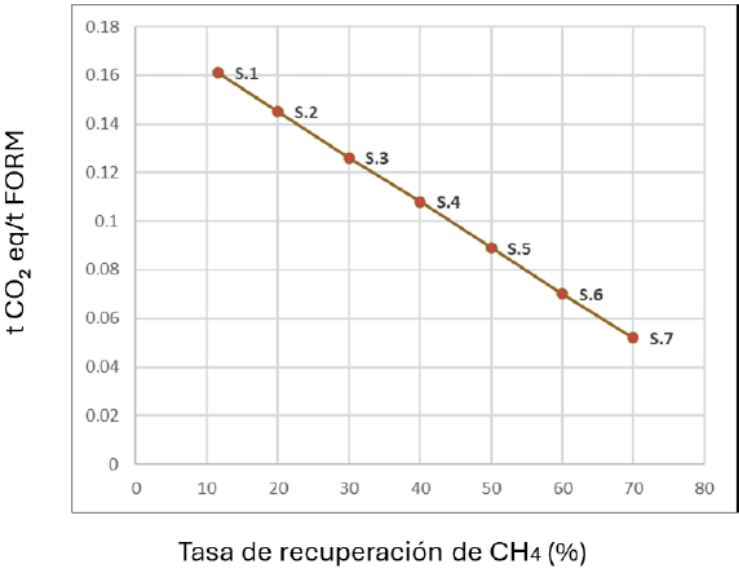


Figura 4.50. Análisis de sensibilidad emisiones netas (t CO2e/t FORM). *Fuente: Elaboración propia a partir de IPCC (2019)*

4.3.7. Resultados del sistema descentralizado (SDC)

4.3.7.1 Descripción del sistema y generación de residuos

En el año 2021 se generaron 323,3 toneladas anuales de residuos urbanos, con una mejora significativa en la separación en origen, lo que permitió aprovechar eficientemente 76,6 toneladas que no ingresaron a rutas de tratamiento convencional. Solo 74,89 toneladas fueron derivadas a tratamiento mecánico-biológico (TMB), de las cuales 67 toneladas fueron incineradas, 0,9 toneladas enviadas a depósito controlado y 7 toneladas correspondieron a fracción seca recuperada.

Respecto a la recolección selectiva, se gestionaron 248,42 toneladas, distribuidas en 102 toneladas de fracción húmeda (de las cuales 90 toneladas fueron materia orgánica destinada a compostaje), 79 toneladas de fracción seca reciclada, y otras 79 toneladas incineradas por no ser recuperables en los flujos de reciclaje.

4.3.7.2. Resultados de huella de carbono y balance neto

El resultado obtenido para el escenario de compostaje comunitario descentralizado presenta un balance neto de emisiones de 0.12 t CO₂ eq por tonelada de FORM tratada, lo que refleja un desempeño ambientalmente favorable en términos de mitigación del cambio climático, especialmente si se compara con otras alternativas centralizadas evaluadas en el sistema.

La totalidad de las emisiones generadas en este tratamiento corresponden a impactos directos (0.16 t CO₂ eq/t), asociadas principalmente a las emisiones biológicas del proceso de compostaje (metano y óxido nitroso). El valor es coherente con sistemas de pequeña escala donde, si bien los procesos de descomposición aerobia son controlados, pueden producir emisiones fugitivas debido a prácticas manuales o falta de biofiltración.

La Tabla 4.30 destaca impactos indirectos mucho menores a los del SCC (1.6 x10⁻⁶t CO₂ eq/t), lo cual es consistente con el diseño descentralizado de este modelo: no requiere consumo significativo de electricidad, lo que elimina una de las principales fuentes de emisiones asociadas al compostaje industrial centralizado. Esta característica resalta como una ventaja estructural del modelo comunitario, especialmente en contextos urbanos o periurbanos con acceso local a la fracción orgánica.

Por otra parte, el escenario incluye un crédito ambiental de -0.05 t CO₂ eq/t por impactos evitados, atribuible a la sustitución de fertilizantes minerales gracias al uso agrícola del compost generado. Este beneficio permite compensar parcialmente las emisiones directas y mejorar el balance final del sistema.

Tabla 4.30. Resultados huella de carbono SCD

TRATAMIENTO	Resultados expresados en t CO2 eq			BALANCE NETO
	Impactos Directos (A)	Impactos indirectos (B)	Impactos evitados (C)	
Compostaje comunitario descentralizado	0.16	1.6 x10 ⁻⁶	-0.05	0.12

4.3.7.3. Análisis de hotspots y ventajas estructurales

El análisis de *hotspots* del sistema de compostaje comunitario descentralizado muestra que el principal punto crítico en términos de huella de carbono corresponde a las emisiones directas, que representan aproximadamente el 65 % del impacto total neto (Figura 4.51). Estas emisiones derivan principalmente del N₂O y de pequeñas fracciones de CH₄ generadas durante la descomposición aeróbica de la materia orgánica. Aunque el sistema busca minimizar condiciones anaerobias, la heterogeneidad operativa pueden favorecer la aparición de microambientes emisores, configurando así el *hotspot* dominante del modelo.

Los impactos indirectos, asociados al consumo energético y a las operaciones auxiliares (electricidad para tamizado y diésel para actividades internas), representan una fracción muy reducida del total (1,6 × 10⁻⁶ t CO₂ eq/t FORM). Este valor refleja la baja dependencia energética del modelo descentralizado, donde no existe una logística de recogida motorizada equivalente a la de los sistemas centralizados y donde las operaciones con maquinaria no constituyen un alto consumo. No obstante, estas emisiones no son nulas y pueden variar según la frecuencia de operación y las condiciones específicas de cada instalación.

El sistema presenta además una compensación ambiental equivalente al 35 % del impacto total, atribuible a los impactos evitados por la sustitución parcial de fertilizantes minerales gracias al uso del compost generado. Esta recuperación

agronómica contribuye a moderar la presión de las emisiones directas sobre el balance climático del sistema.

En conjunto, el principal *hotspot* identificado corresponde al proceso biológico del compostaje, mientras que la baja demanda energética y la generación de beneficios evitados consolidan al compostaje comunitario descentralizado como una alternativa climáticamente favorable para la gestión local de biorresiduos.

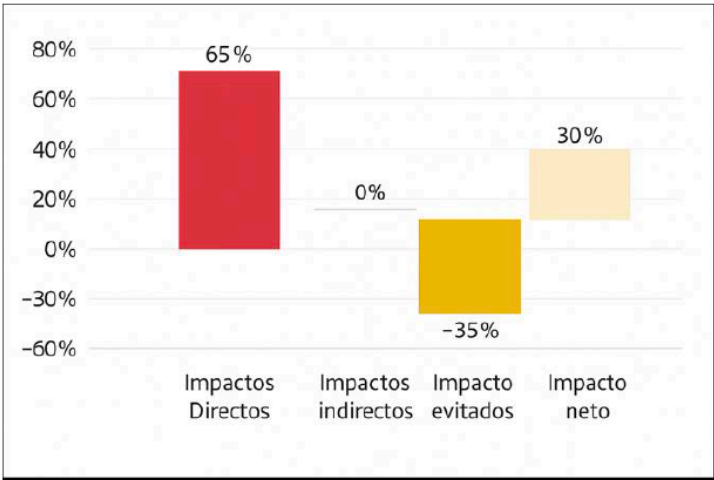


Figura 4.51. Análisis de hotspots y ventajas estructurales. Fuente: Elaboración propia

4.3.8. Comparación entre SCC y SDC

4.3.8.1. Comparación de emisiones totales y balance neto

La Figura 4.52 presenta una comparación entre el sistema de compostaje descentralizado (SDC, izquierda) y el sistema de compostaje centralizado (SCC, derecha), evaluados en términos de su huella de carbono expresada en toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de FORM tratada. La comparación se desglosa en tres componentes: impactos emitidos, impactos evitados e impactos netos.

En primer lugar, los impactos emitidos son menores en el sistema descentralizado (0.16 t CO₂eq) en comparación con el centralizado (0.23 t CO₂eq). Esta diferencia se explica fundamentalmente por la reducción en el consumo energético, el menor uso de transporte y la escala más localizada de operación en el sistema SDC, que evita emisiones asociadas a procesos logísticos e infraestructuras intensivas.

En cuanto a los impactos evitados, ambos sistemas presentan contribuciones similares (-0.05 t CO₂eq), asociadas a la sustitución de fertilizantes sintéticos gracias a la aplicación del compost generado.

El resultado más significativo se observa en los impactos netos, donde el sistema descentralizado presenta un impacto total de 0.12 t CO₂eq/t FORM, mientras que el sistema centralizado alcanza los 0.23 t CO₂eq/t FORM, es decir, casi el doble de emisiones netas del SCD. Esto posiciona al sistema descentralizado como claramente más eficiente desde el punto de vista climático.

Esta diferencia subraya la relevancia del diseño del sistema de gestión, ya que el enfoque descentralizado puede reducir significativamente las emisiones operativas al fomentar la separación en origen, minimizar los traslados y aumentar la eficiencia en la valorización local. En términos de mitigación del cambio climático, estos factores respaldan la implementación de estrategias de compostaje descentralizado como una opción potencialmente más beneficiosa, especialmente en contextos con capacidad local de gestión. No obstante, diversos estudios han advertido que los beneficios ambientales del compostaje descentralizado no están garantizados por el modelo en sí, sino que dependen directamente de cómo esté diseñado y operado. En particular, cuando se utilizan compostadores tipo contenedor sin sistemas adecuados de aireación forzada, mezcla homogénea o captación de gases, se pueden generar emisiones elevadas de metano (CH₄), amoníaco (NH₃) y óxidos de nitrógeno (N₂O) (Bruni *et al.*, 2020; Nordahl *et al.*, 2023; Weidner *et al.*, 2020). En esos casos, las emisiones pueden ser incluso mayores que las registradas en instalaciones centralizadas bien tecnificadas. Esta evidencia pone de manifiesto la importancia de asegurar condiciones técnicas mínimas de calidad para que el modelo descentralizado cumpla realmente con sus objetivos ambientales. Adicionalmente estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que el estudio se apoya principalmente en datos secundarios y supuestos representativos.

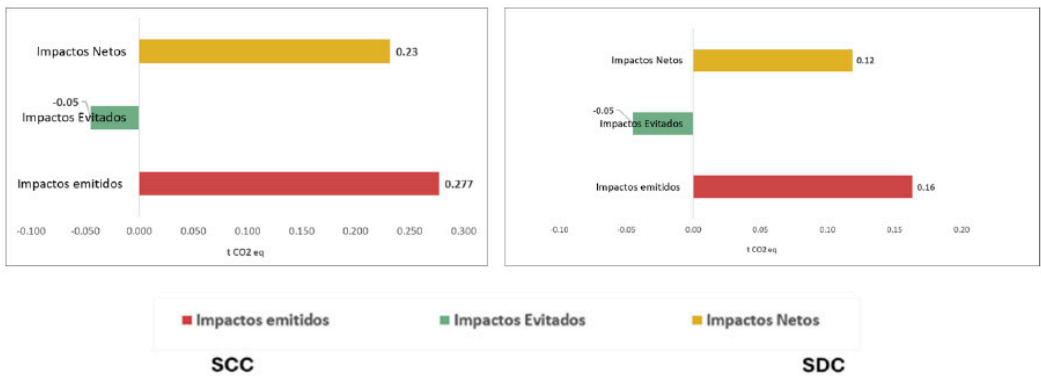


Figura 4.52. Comparación de emisiones SCC Vs SDC. Fuente: Elaboración propia

4.3.8.2. Resultados en relación con literatura científica

Los impactos emitidos obtenidos en este estudio para el tratamiento de una tonelada de FORM mediante compostaje descentralizado (SDC) y compostaje centralizado (SCC) se encuentran en valores consistentes con los rangos reportados en la literatura especializada. El compostaje descentralizado presentó un impacto total de 120 kg CO₂ eq/t FORM, mientras que el sistema centralizado registró 230 kg CO₂ eq/t FORM. De acuerdo con los rangos sintetizados en el metaanálisis de (Serafini,et, al 2023), el home composting —comparable metodológicamente al sistema descentralizado— muestra valores que oscilan entre 56 y 209 kg CO₂ eq/t, mientras que, el compostaje industrial —equivalente al modelo centralizado— se sitúa entre 97 y 150 kg CO₂ eq/t.

Así, el valor obtenido para el sistema descentralizado se ubica claramente dentro del rango reportado para compostaje doméstico, con un resultado ligeramente más alto que el estimado por Colon *et al.* (2010) para home composting (82 kg CO₂ eq/t) y menor a (209 kg CO₂) (Colon *et al.*2012). En cuanto al compostaje centralizado, aunque el valor de 230 kg CO₂ eq/t supera el límite superior del rango citado para compostaje industrial (150 kg), sigue siendo comparable con casos de plantas más intensivas energéticamente, y se mantiene dentro del rango más amplio de otros casos analizados en la literatura (hasta 270 kg CO₂ eq/t en algunos estudios (Lee et al, 2007)). Esto confirma que los resultados de este estudio no solo son coherentes con la evidencia internacional, sino que también refuerzan el potencial del modelo descentralizado para minimizar las emisiones generadas en la gestión de residuos orgánicos.

El resultado de huella de carbono estimado para el sistema de compostaje centralizado fue de 0.23 t CO₂ eq por tonelada de FORM tratada, compuesto por 0.220 t CO₂ eq de emisiones directas (principalmente N₂O y CH₄ emitidos durante el proceso de degradación aeróbica) y 0.057 t CO₂ eq de emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad y combustibles fósiles. Este valor se encuentra dentro del rango reportado por estudios previos como Colón *et al.* (2012) y Rigamonti *et al.* (2010), y es coherente con el promedio identificado en revisiones sistemáticas como la de Serafini *et al.* (2023).

4.3.9. Beneficios ambientales complementarios

Si bien el presente estudio se enfoca en el análisis comparativo de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM), es importante destacar que la implementación del sistema descentralizado de compostaje comunitario (SDC), en combinación con el cambio del modelo de recolección de residuos —de contenedores en acera a un esquema puerta a puerta—, ha generado beneficios colaterales significativos en el conjunto del sistema de gestión municipal de residuos sólidos urbanos (RSU).

Uno de los efectos más relevantes observados es la mejora sustancial en la separación en origen, tal como lo refleja la comparación de los modelos SCC (sistema anterior) y SCD (modelo actual) en la Figura adjunta. La fracción de residuos mezclados se redujo del 43 % al 21 %, mientras que la fracción orgánica separada aumentó del 16,7 % al 28,4 %, lo que evidencia una mejora cerca del 70 % en la recuperación de biorresiduos. De forma paralela, también se registraron incrementos en otras fracciones reciclables: los residuos multiproducto pasaron del 22 % al 31 %, el vidrio del 8 % al 10 %, y otras fracciones menores del 9 % al 10 %. Este cambio estructural en los flujos de residuos ha permitido que la totalidad de la fracción orgánica municipal sea actualmente tratada mediante compostaje comunitario, en contraste con años anteriores, donde solo se compostaba el 50 %.

Aunque estos beneficios no se incorporan cuantitativamente en el inventario funcional del presente análisis de ciclo de vida —cuyo límite se restringe a 1 tonelada de FORM tratada—, constituyen impactos sistémicos positivos no despreciables, ya que reducen la carga de fracciones no reciclables, mejoran la calidad de los residuos recuperados y

optimizan los procesos de valorización material. Estos resultados son coherentes con lo documentado por Bernstad *et al.* (2012) y Boldrin *et al.* (2009), quienes reportan mejoras similares en eficiencia ambiental y operacional tras la implementación conjunta de compostaje descentralizado y recolección selectiva puerta a puerta. No obstante, dichos efectos requieren una modelización específica que considere los cambios en la composición de los residuos, las rutas logísticas y las tasas de reciclaje, lo cual excede el alcance metodológico definido en el presente estudio.

En suma, el cambio hacia un sistema descentralizado de gestión, apoyado en compostaje comunitario y recogida selectiva domiciliaria, no solo reduce la huella de carbono directa del tratamiento de la FORM, sino que fortalece de manera transversal la sostenibilidad del sistema de residuos urbanos, al fomentar una mayor participación ciudadana, mejorar la separación en origen y maximizar el aprovechamiento de los recursos.

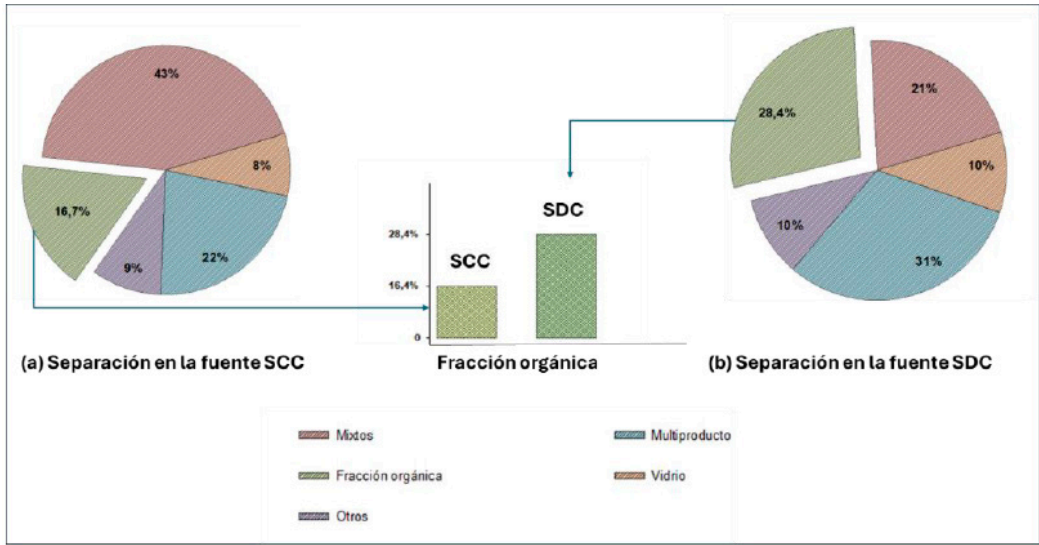


Figura 4.53. Comparación del porcentaje de separación en origen de las diferentes fracciones de residuos, en función de la gestión de residuos y tratamiento de la fracción orgánica. (a). Separación en origen con contenedores, acera y proceso centralizado de compostaje de fracción orgánica. (b). Recogida puerta a puerta y tratamiento descentralizado de la materia orgánica. (c) Diferencia de fracción orgánica entre la materia orgánica tratada antes y después del compostaje comunitario. Fuente: *Elaboración propia*

4.3.10. Limitaciones del estudio y recomendaciones

4.3.10.1. Justificación de la selección de categoría de impacto

Este estudio se centró exclusivamente en la evaluación del impacto climático, a través del indicador de huella de carbono (expresada en t CO₂ eq), como categoría única de análisis en el marco del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). La elección de esta categoría responde a su alta relevancia ambiental y política en el contexto de la gestión de residuos y la descarbonización urbana, así como a su frecuencia de uso en estudios comparables, según Rigamonti *et al.* (2010), Bernstad & la Cour Jansen, (2012), Serafini *et al.*, (2023). Diversas revisiones sistemáticas han demostrado que el calentamiento global suele ser el impacto dominante en sistemas de tratamiento de residuos orgánicos, especialmente por la generación de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y el uso de combustibles fósiles en procesos de transporte y tratamiento (Lu *et al.*, 2020; Boldrin *et al.*, 2009).

4.3.10.2. Impactos no considerados

Se reconoce como una limitación del presente estudio la exclusión de otras categorías ambientales relevantes dentro del enfoque multicriterio del ACV, tales como la acidificación del suelo y del agua, la eutrofización, la formación de ozono troposférico y la toxicidad humana y ecotoxicológica, las cuales también pueden verse afectadas por emisiones de amoníaco (NH₃), lixiviados mal gestionados o consumo de recursos materiales y energéticos. Si bien estos impactos no fueron incluidos en el alcance analítico, su consideración sería necesaria en futuras investigaciones con enfoque ambiental integral.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN GENERAL



CAPÍTULO V

DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación permiten no solo validar la viabilidad operativa del modelo en Les Masies de Roda, sino también extraer aprendizajes valiosos para su aplicación estructural en otros territorios. En este sentido, se propone un marco general para la implantación del compostaje comunitario descentralizado como vía principal —y en ciertos contextos, única— para el tratamiento de la fracción orgánica municipal.

Dicho marco se sostiene sobre tres pilares fundamentales: Las condiciones operativas, Institucionales, y la participación ciudadana activa. Desde el punto de vista operativo y específicamente tecnológico, la experiencia piloto demuestra que el compostaje descentralizado es plenamente funcional con infraestructuras de baja complejidad, siempre que se asegure un acompañamiento técnico básico y una planificación de operación eficiente. A nivel institucional, el liderazgo y voluntad municipal, el acceso a mecanismos de cofinanciación pública y la integración del modelo en los servicios urbanos básicos son factores determinantes para su consolidación. Y desde la dimensión social, la implicación de la ciudadanía —no sólo como usuaria del sistema, sino como agente corresponsable del proceso— resulta esencial para mantener la trazabilidad y calidad del compost generado.

Este modelo adquiere una relevancia particular en municipios de pequeña escala, donde el compostaje descentralizado no solo es viable, sino la opción más coherente con los principios de proximidad, eficiencia y economía circular. En estos entornos, la gestión in situ de la fracción orgánica permite cerrar el ciclo de los nutrientes, eliminar el transporte innecesario y reintegrar el compost generado en suelos agrícolas o zonas verdes del propio municipio.

El uso agronómico del compost debe, por tanto, ser entendido no como un destino opcional del residuo tratado, sino como parte central del modelo. El retorno del compost a la tierra local —en huertos urbanos, agricultura de proximidad o espacios públicos— permite materializar la lógica circular y ecológica del sistema, al tiempo que refuerza los vínculos entre la gestión de residuos y las políticas alimentarias locales.

En este marco, el compostaje descentralizado no debe evaluarse únicamente como una solución técnica, sino como un instrumento de política pública transversal que se vincula directamente con los objetivos de planificación climática (mitigación de emisiones y sumideros de carbono), de salud del suelo y de soberanía alimentaria. Por ello, su incorporación en planes municipales, estrategias agroecológicas o agendas alimentarias urbanas puede contribuir de forma efectiva al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente los ODS 11, 12, 13 y 15.

Así, lo que comenzó como una iniciativa experimental en un municipio catalán se perfila hoy como un modelo con valor estructural y replicable. Su implantación requiere adaptación contextual, pero ofrece una ruta clara hacia sistemas de gestión de residuos más circulares, resilientes y enraizados en el territorio.

El análisis del caso de Les Masies de Roda permite ilustrar en la práctica cómo se articula este modelo estructural en contextos reales, y ofrece evidencia empírica clave para sustentar su replicabilidad.

5.1. LECCIONES DESDE LA EXPERIENCIA DE LES MASIES DE RODA

El estudio de caso en Les Masies de Roda (LMR) permite respaldar empíricamente la hipótesis central de esta tesis: el compostaje comunitario descentralizado puede consolidarse como una vía única, viable y sostenible para el tratamiento de la fracción orgánica en municipios de pequeña y mediana escala. El modelo implementado (escenario 3A) evidenció una elevada eficiencia técnica, con tasas de recuperación superiores al 90 %, un impacto climático neto significativamente menor (0,12 t CO₂ eq/t frente a 0,23 t CO₂ eq/t del sistema centralizado) y una operatividad adecuada basada en una profesionalización parcial y una mecanización ligera. Esta reducción de emisiones se atribuye principalmente a la menor dependencia energética del sistema, a la eliminación de largos trayectos de transporte y a la valorización agronómica del compost generado en el propio territorio.

Desde una perspectiva económica, el sistema descentralizado implementado en Les Masies de Roda demostró ser competitivo frente al modelo centralizado, al presentar un coste operativo por tonelada (168 €/t) inferior al de este último (189 €/t), y una rentabilidad positiva en escenarios con retorno del canon. En particular, el escenario

3A permitió alcanzar un horizonte de amortización de tan solo siete años, lo que resulta especialmente relevante en contextos municipales con recursos financieros limitados. Esta viabilidad financiera refuerza el papel estratégico de los instrumentos de fiscalidad ambiental —como el canon de residuos en Cataluña—, que no solo penalizan prácticas menos sostenibles, sino que incentivan activamente la adopción de modelos de bajo impacto como el compostaje comunitario descentralizado.

Desde el plano social, el modelo evidenció una alta aceptación ciudadana, con un 94 % de satisfacción vecinal, y aportes significativos en términos de cohesión comunitaria, creación de empleo verde y equidad de género. En conjunto, estos resultados configuran un sistema integrado, con contribuciones positivas y equilibradas en las tres dimensiones de la sostenibilidad: técnica, económica y social.

Estos resultados encuentran eco en diversas experiencias europeas que han consolidado el compostaje descentralizado como una opción estratégica dentro de sus políticas de gestión de residuos. Países como Italia, Francia y Bélgica han desarrollado marcos normativos e institucionales que favorecen su implementación, con resultados consistentes en términos de calidad del compost, reducción de emisiones y fortalecimiento de la participación ciudadana. En contraste, el contexto español aún presenta limitaciones estructurales, como la ausencia de un censo nacional y la falta de datos sistematizados que permitan dimensionar con precisión la infraestructura existente. Esta carencia dificulta el seguimiento del modelo y condiciona su expansión, a pesar del alto potencial identificado en municipios de pequeña escala. A continuación, se examinan más en detalle algunas de estas experiencias internacionales que permiten situar el caso de Les Masies de Roda en un contexto comparado.

5.1.1 Perspectiva del mercado europeo

En Italia, regiones como Emilia-Romagna o Toscana ofrecen incentivos fiscales y logísticos a través de programas de compostaje local, permitiendo ahorros significativos en emisiones y mejora en la estabilidad del compost (Favoio & Hogg, 2008; Faverial *et al.*, 2017). En Francia, la ADEME ha documentado más de 12.000 sitios de compostaje comunitario funcionando bajo esquemas de participación vecinal, con beneficios ambientales superiores frente a sistemas centralizados, incluyendo una reducción de hasta cinco veces en la huella de carbono (ADEME, 2015). Por su parte,

en Bélgica, la región de Flandes ha consolidado una red estable de compostadores comunitarios gestionados en colaboración con la ciudadanía y autoridades locales, con evidencias de altas tasas de recuperación y baja intensidad de emisiones (De Baere *et al.*, 2011; Kupper *et al.*, 2017).

En el caso de España, la evaluación del compostaje descentralizado —incluyendo tanto el comunitario como el doméstico— se ve limitada por la ausencia de un sistema de información consolidado a nivel estatal. Actualmente no existe un censo oficial ni una base de datos pública que permita conocer el número total de instalaciones de compostaje descentralizado en funcionamiento, su distribución territorial, ni su rendimiento ambiental o social. Esta falta de datos dificulta el seguimiento del cumplimiento de la Directiva (UE) 2018/851, que promueve la valorización de los biorresiduos mediante tratamiento in situ y separación en origen. La información disponible procede principalmente de iniciativas regionales —como el caso de Cataluña— o de estudios de caso impulsados por proyectos europeos y redes locales. Esta falta de información sugiere que el compostaje descentralizado, lejos de estar consolidado, permanece en una fase incipiente, lo que resalta su alto potencial de expansión como vía principal o complementaria de tratamiento, especialmente en municipios rurales, pequeños y medianos. Esta observación plantea la necesidad de analizar en qué contextos territoriales resulta viable su implantación y cuáles son los límites operativos y estructurales del modelo.

5.2. APLICABILIDAD TERRITORIAL Y LÍMITES DEL MODELO

Asimismo, el modelo es escalable dentro de su nicho de aplicación. Solo en España, se estima que más de 211.000 toneladas/año de FORM generadas en municipios con menos de 150 t/año podrían ser tratadas mediante sistemas descentralizados como el aquí propuesto.

El rango operativo identificado (30–150 t/año) y una población atendida entre 1000 y 1200 habitantes constituyen los límites de aplicabilidad más eficientes, según datos propios y revisiones internacionales. Para municipios mayores, se recomienda explorar modelos híbridos o estrategias de sectorización adaptadas. Asimismo, se sugiere priorizar la implementación del modelo en municipios rurales, con alta cohesión social, voluntad política, y disponibilidad de espacio público para la infraestructura.

5.2.1. Replicabilidad en España

Tal como se argumenta, el modelo SDC no se plantea como una solución universal, sino como una respuesta situada y adaptable a contextos con baja generación de residuos y alta potencialidad comunitaria. A través del análisis geoespacial (QGIS), se identificó un mercado potencial de más de 211.000 toneladas/año de materia orgánica en municipios de ≤150 t/año de generación, distribuidos principalmente en Cataluña, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Valencia y Extremadura (Tabla 5.1). Este volumen representa un 3,2 % de la generación total de FORM en España, y permite cuantificar la escala real de intervención que este modelo podría alcanzar.

Tabla 5.1. Comunidades autónomas con potencial de replicabilidad

Provincia	Materia orgánica municipal
	(t/año)
Castilla León	94.256
Catilla La mancha	40.636
Catalunya	32.575
Extramadura	23.746
Valencia	19.803
TOTAL	211.016

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (2018)

Teniendo en cuenta la huella de carbono obtenida en el capítulo 4. Sección III Resultados ambientales. Estas toneladas de FORM bajo un sistema de tratamiento centralizado, generan cerca de 48.500 t CO₂ eq/año, al tratarse de manera descentralizada se generarían alrededor de 25.000 t CO₂ eq/año, es decir que se evitarían alrededor de 23.000 t CO₂ eq/año.

El sistema probado en Les Masies de Roda —que gestiona 90 t/año con éxito técnico, económico y social— valida plenamente el modelo base. De allí se deriva un principio clave: no es una excepción exitosa, sino un caso representativo con alto potencial de replicabilidad, siempre que se mantenga dentro del rango operativo identificado.

El mercado potencial se define en los municipios que generan menos de 150 toneladas/año, cifras que están cercanas al modelo de LMR (100 t/año), así como municipios que se encuentren en rangos de generación de residuos de 0-50, 50-100 y 100-150 t/

año. La Figura 5.1, muestra el Mapa de generación de materia orgánica en España, en donde se resaltan los municipios de color azul y verde, los cuales a su vez se clasifican por comunidades autónomas. Las zonas de color blanco son zonas excluidas debido a que es una generación mayor a 500 t/año.

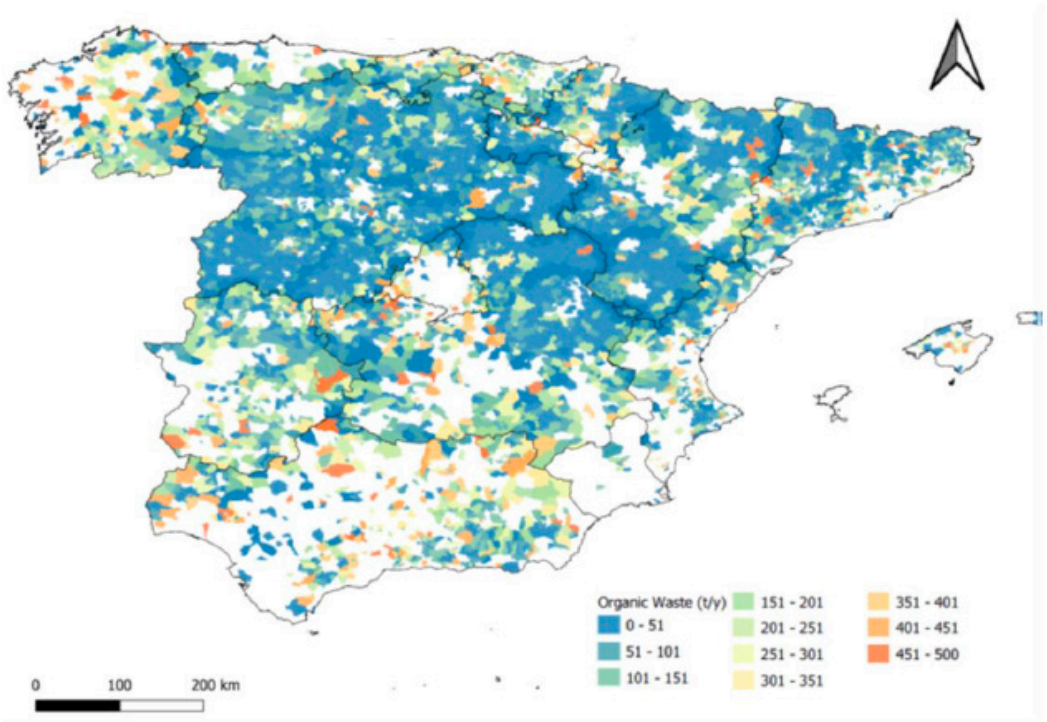


Figura 5.1. Mapa de generación de residuos orgánicos en España. Fuente Elaboración propia a partir de Idescat, (2024)

5.2.2. Replicabilidad en Europa

Según la base de datos de Eurostat (2016) que clasifican la densidad de población y la tipología de las zonas (urbanas, intermedias y rurales) en los países de la Unión Europea, se seleccionaron los países con zonas rurales que compartían características similares a las de LMR, especialmente en términos de densidad de población y tipología. A partir de la población rural de estos países, se calculó la generación total de residuos municipales, considerando una media de 513 kg per cápita y un 28 % de materia orgánica en los residuos, arrojando como resultado que aproximadamente 10 millones de toneladas de materia orgánica al año, equivalentes al 13 % del total generado en la Unión Europea, podrían ser tratadas por SDC.

Entre los países con mayor potencial de replicabilidad se identificaron Alemania, Francia, Italia y España. Cabe señalar que el porcentaje del 13 % es una estimación que podría variar, ya que no todos los municipios considerados pueden implementar el proyecto. La Tabla 5.2 resume este análisis, mostrando la cobertura potencial de los sistemas de tratamiento de residuos orgánicos en relación con la población total de la UE, que asciende a 623 millones de personas. Distingue entre los sistemas de tratamiento centralizados (que dan servicio a 550 millones de personas y tratan 79 Mt/año) y los SDC (que podrían dar servicio a 73 millones de residentes rurales y tratar 10 Mt/año), lo que da como resultado una cobertura global del 100 % de los residuos orgánicos de Europa.

Tabla 5.2. Población que podría beneficiarse y capacidad de materia orgánica que se puede tratar

INDICADOR	SISTEMA DE TRATAMIENTO		TOTAL
	TRATAMIENTO CENTRALIZADO ¹	SISTEMA DE COMPOSTAJE DESCENTRALIZADO	
Población (millón)	550	73	623
Total, residuos orgánicos (Mt/año)	79	10	89
cobertura (%)	87	13	100

¹Tratamiento centralizado: compostaje, digestión anaeróbica, incineración con recuperación de energía, pirólisis y gasificación, codigestión en plantas residuales o sin tratar y eliminación en vertederos. Fuente: Elaboración propia a partir de Eurostat (2016)

5.2.3. Recomendaciones según el tamaño del municipio

A partir de la validación empírica del modelo en LMR y del análisis comparativo con otros casos internacionales, es posible establecer una serie de recomendaciones para su implementación según el tamaño y las características de los municipios. Estas recomendaciones buscan delimitar el rango óptimo de aplicabilidad del sistema, identificando tanto sus condiciones de éxito como sus límites estructurales.

Recomendado para:

- Municipios ≤1500 habitantes.
- Generación anual de FORM ≤150 t.

- Zonas alejadas y/o de difícil acceso para el transporte a sitio de tratamiento y/o disposición final
- Presencia de participación ciudadana activa.
- Disponibilidad de espacio para instalación y área de postprocesamiento.
- Voluntad política local y soporte técnico.

No recomendado para: Municipios grandes (≥ 50.000 habitantes), por tres razones clave:

- Carga operativa excesiva: La gestión manual requeriría una cantidad inviable de horas/persona.
- Pérdida del principio de proximidad: La mecanización masiva convertiría el modelo en un sistema industrial.
- Complejidad logística: Coordinación de cientos de puntos de compostaje, transporte de estructurante y compost, y control de calidad dificultaría su gestión.
- Incluso en escenarios tecnificados como el 3A, su escalabilidad está pensada para pequeños municipios. Su traslado a contextos urbanos masivos exigiría una transformación estructural que desnaturaliza la esencia del modelo descentralizado.

Más allá de sus condiciones técnicas y territoriales de aplicabilidad, la consolidación del compostaje descentralizado como modelo estructural también depende de su viabilidad económica y del respaldo institucional que garantice su sostenibilidad en el tiempo.

5.3. VIABILIDAD FINANCIERA DEL MODELO: ESCENARIOS Y MECANISMOS DISPONIBLES

Aunque los fondos originalmente previstos en el PINFRECAT20 ya han sido ejecutados o reasignados, el plan no ha sido derogado y sigue vigente como marco normativo territorial en materia de infraestructuras de residuos en Cataluña. Su contenido mantiene valor como instrumento de planificación estratégica, especialmente para justificar proyectos que requieren adecuación territorial. Además,

se encuentra en fase de revisión: la Agència de Residus de Catalunya ha iniciado un proceso participativo para diseñar el nuevo PINFRECAT 2025–2035, que actualizará la red de instalaciones, reducirá el vertido y reforzará el tratamiento descentralizado de la materia orgánica. Este proceso confirma que el modelo de planificación sigue activo, aunque su capacidad financiera efectiva dependerá de futuras asignaciones presupuestarias.

Aunque aún no se han definido los contenidos presupuestarios del nuevo **PINFRECAT 2025–2035**, su diseño en curso abre la posibilidad de que se incluyan instrumentos de apoyo financiero a infraestructuras de tratamiento descentralizado, especialmente si se alinean con los objetivos de economía circular, descarbonización y proximidad. Esta eventual inclusión reforzaría el papel del compostaje comunitario como tecnología estructural dentro de la planificación catalana de residuos.

Dicho esto, la viabilidad económica del compostaje comunitario descentralizado debe apoyarse en instrumentos vigentes, mecanismos fiscales estables y esquemas de financiación adaptados a la escala municipal. En Cataluña, el retorno del canon sobre la disposición de residuos se configura actualmente como el mecanismo más eficaz y estructural para financiar estos sistemas. Su lógica cumple una doble función:

- Incentivar la valorización local, modulando el coste de la gestión según el tipo de tratamiento.
- Compensar externalidades evitadas, como el transporte y las emisiones, bajo el principio «quien contamina paga».

A partir de este marco, es posible identificar diferentes escenarios de financiación que responden a las condiciones fiscales y operativas de cada municipio. Estos modelos varían según el origen de los recursos disponibles, la capacidad de asumir inversiones iniciales y el uso estratégico del retorno del canon como instrumento de sostenibilidad financiera.

Escenario 1: Autofinanciación, canon como mecanismo de amortización del CAPEX

Aunque el canon no fue concebido como fondo de inversión, en ciertos contextos puede operar como un flujo de caja estructural que permite recuperar la inversión inicial. En

Les Masies de Roda, con 58 compostadores y un canon de 300 €/compostador/año, se obtiene un retorno de 17.400 €/año, suficiente para amortizar una inversión inicial de 118.000 € en menos de siete años. Este enfoque ha demostrado ser financieramente viable, con un VAN positivo, una TIR del 14 % y autonomía progresiva del sistema. Por tanto, los municipios que puedan asumir el CAPEX inicial mediante recursos propios (remanentes, préstamos blandos o fondos de inversión) podrían recuperar su inversión vía retorno del canon en un horizonte razonable de 6 a 10 años.

Escenario 2: Financiación externa y programas europeos

Para aquellos municipios que no dispongan de capacidad fiscal inmediata, existen programas europeos y líneas de apoyo complementarias que pueden cubrir parcial o totalmente el CAPEX. Entre ellos destacan:

- Fondos LEADER para desarrollo rural (enfocados en iniciativas comunitarias sostenibles).
- Next Generation EU para proyectos alineados con el Pacto Verde Europeo.
- LIFE Programme, que financia tecnologías ambientalmente innovadoras, incluyendo compostaje descentralizado.
- Fondos de transición ecológica y cohesión territorial de ámbito autonómico o estatal.
- Programas específicos de economía circular gestionados por entes supramunicipales.

Este escenario permite a los municipios con baja capacidad de inversión inicial externalizar el riesgo financiero y depender del canon únicamente para cubrir el OPEX y realizar mejoras operativas.

Escenario 3: Modelo híbrido

La experiencia de Les Masies de Roda muestra que el retorno del canon es potente pero limitado como única fuente de inversión. Su fortaleza reside en asegurar la viabilidad operativa y acelerar la recuperación de costes cuando se combina con otras fuentes. Por ello, la vía más robusta y replicable en el contexto catalán es un modelo híbrido, basado en:

Inversión inicial asumida por el municipio o captada vía fondos europeos u otras subvenciones.

Amortización parcial del CAPEX y cobertura del OPEX a través del retorno del canon, condicionado al cumplimiento de objetivos de valorización local.

Este enfoque multicanal se ajusta al principio de corresponsabilidad institucional, fomenta la autonomía técnica y financiera de los municipios y garantiza un uso eficiente de los recursos públicos. En particular, fortalece la replicabilidad del modelo descentralizado en municipios rurales y de menos de 1.500 habitantes, donde las soluciones centralizadas resultan ineficientes o inviables. La Tabla 5.3 resume los escenarios mencionados anteriormente.

Tabla 5.3. Modelos de financiación del CAPEX

Modelo de financiación	Origen del CAPEX	Uso del retorno del canon	Municipios recomendados
1. Autofinanciación municipal	Remanentes o préstamos propios	Amortización progresiva del CAPEX + OPEX	Municipios solventes o con alta tasa de retorno
2. Financiación externa	Programas europeos o fondos climáticos	Sostenimiento del OPEX y reinversión	Municipios con baja capacidad fiscal
3. Modelo híbrido	Aportación local parcial + financiación complementaria	Amortización parcial del CAPEX + cobertura operativa	Municipios medianos con acceso a fondos compartidos

Fuente: Elaboración propia.

5.4. DINÁMICA DE MERCADO Y PROYECCIONES DE CRECIMIENTO

El análisis de mercado revela un crecimiento acelerado de la infraestructura de compostaje descentralizado, aunque con baja consolidación del compostaje comunitario estructural. En Cataluña, solo el 6,6 % de los más de 28.000 compostadores instalados son comunitarios. Sin embargo, existe un amplio margen de crecimiento: solo en Cataluña hay 255 municipios potenciales y una capacidad de tratamiento de 32.575 t/año. El mercado de compostadores muestra diversidad de proveedores y tecnologías, con soluciones modulares escalables. Las proyecciones de crecimiento del 30–50 % anual apuntan a una capacidad de hasta 211.000 t/año en una década, siempre que

se activen mecanismos de financiación estables y se fomente la profesionalización del sector.

5.4.1. Capacidad instalada y grado de consolidación del compostaje descentralizado en Cataluña

De acuerdo con datos de la Agència de Residus de Catalunya (2019), en Cataluña se contabilizaban 28.093 compostadores en funcionamiento, de los cuales solo 505 correspondían a compostadores comunitarios utilizados como vía exclusiva de tratamiento, es decir, apenas el 6,6 % de los casos. La gran mayoría (93,38 %) eran compostadores individuales. Esta proporción refleja que el compostaje descentralizado comunitario se encuentra aún en una fase incipiente, y que las experiencias comunitarias estructurales como la desarrollada en LMR siguen siendo excepcionales. A nivel agregado, Vermican —uno de los principales proveedores nacionales de tecnologías para compostaje descentralizado— ha reportado la instalación de más de 5.000 compostadores en el periodo comprendido entre 2014 y 2024, distribuidos en territorios de España, Francia, Portugal, Italia y Grecia. Esta cifra duplica ampliamente las estimaciones disponibles hasta 2020, que situaban el número en 2.386 unidades. Aunque no se dispone de una desagregación oficial entre compostadores comunitarios y domésticos, el proveedor indica que una proporción significativa corresponde a modelos modulares de uso comunitario, con capacidades unitarias que oscilan entre 2 y 18 toneladas/año. Esta evolución sugiere que la capacidad instalada real del mercado ha crecido sustancialmente y podría superar las 10.000 toneladas/año.

Desde una perspectiva metodológica, cabe señalar que los datos referidos provienen de fuentes del propio proveedor, por lo que deben interpretarse como una estimación orientativa en ausencia de registros oficiales. Esta carencia de información sistematizada refuerza la necesidad de establecer un censo nacional de instalaciones descentralizadas que permita caracterizar la infraestructura existente, evaluar su rendimiento y orientar políticas de apoyo adecuadas.

5.4.2. Mercado potencial en Cataluña y España

La cartografía de generación de materia orgánica realizada mediante QGIS muestra que existen 255 municipios en Cataluña con una generación anual inferior a 150 toneladas/año de materia orgánica, lo que los convierte en candidatos idóneos para

implementar modelos de compostaje descentralizado. Este volumen representa una oportunidad de mercado de 32.575 toneladas/año, frente a las cuales la capacidad instalada actual cubre apenas el 14,6 %.

Ampliando la escala al conjunto del Estado español, se identifica un mercado potencial de 211.016 toneladas/año, ubicadas principalmente en comunidades como Castilla y León, Castilla-La Mancha, Cataluña, Extremadura y Comunidad Valenciana. Este segmento representa el 3,2 % del total de la materia orgánica generada en España, y sería susceptible de ser tratado mediante SCD en municipios con menos de 1.200 habitantes.

5.4.3. Proveedores y tecnologías disponibles

El mercado de compostadores comunitarios en España está compuesto por un número limitado pero creciente de proveedores. Entre los más relevantes se encuentran Vermican, Alquienvas, Elkarkide, Bercagroup y Leanpio. Vermican destaca por su presencia en múltiples comunidades autónomas, y por haber desarrollado el primer compostador modular en 2014, alcanzando más de 2.000 unidades instaladas que gestionan entre 2 y 18 toneladas/año, según el tipo de compostador.

En general, los equipos ofertados se clasifican en tres categorías: (i) compostadores individuales; (ii) compostadores modulares o comunitarios (de 1100 L a 2000 L); y (iii) compostadores automáticos o industrializados. Para el modelo de LMR, los compostadores comunitarios modulares han demostrado ser la opción más adecuada, por su balance entre capacidad, ergonomía y escalabilidad.

5.4.4. Proyecciones de crecimiento del mercado

Considerando escenarios de crecimiento del 30 % y 50 % anual, se ha estimado que, en 10 años, podría alcanzarse la instalación de más de 35.000 compostadores, con capacidad de tratamiento cercana a las 211.000 toneladas/año. Estas cifras muestran que el mercado podría expandirse rápidamente si se establecen incentivos adecuados y mecanismos de financiación estables.

5.5. EL COMPOST COMO RECURSO ESTRATÉGICO: DEMANDA, CALIDAD Y USOS

El compostaje descentralizado debe entenderse como una estrategia circular integral, donde el uso agronómico del compost es parte central del modelo. La demanda creciente de compost en agricultura ecológica y la existencia de más de 250.000 hectáreas certificadas en Cataluña refuerzan esta lógica. El compost generado puede insertarse en circuitos cortos, fortalecer la soberanía alimentaria y reducir la dependencia de insumos externos.

Además, su valorización requiere garantizar la calidad agronómica y sanitaria, conforme al Reglamento (UE) 2019/1009. Esto implica profesionalizar los procesos de monitoreo y trazabilidad, lo que a su vez abre oportunidades para su comercialización responsable en mercados locales.

Si bien el modelo evaluado en esta investigación contempla la entrega gratuita de compost a la ciudadanía como mecanismo de incentivo a la participación comunitaria, es necesario considerar que, en contextos de replicabilidad, el compost puede adquirir un valor económico adicional. Esto es particularmente relevante en regiones como Cataluña, donde la vocación agrícola es significativa y la demanda de fertilizantes orgánicos se ha incrementado en paralelo al auge de la agricultura ecológica.

De acuerdo con los datos del Departament d'Acció Climàtica (2023), Cataluña cuenta con 256.406 hectáreas certificadas como agricultura ecológica, representando un crecimiento del 5,37 % respecto al año anterior y consolidando su posición como una de las comunidades autónomas líderes en producción ecológica. Este tipo de agricultura exige un uso intensivo de enmiendas orgánicas como el compost para mantener la fertilidad del suelo sin recurrir a fertilizantes sintéticos, lo que incrementa la demanda estructural de compost de calidad.

Además, estudios como el de Sánchez et al (2022) indican que los productos compostados generados localmente presentan ventajas competitivas en términos de trazabilidad, menor huella de carbono y adaptación a las necesidades agroecológicas del territorio. En este sentido, el compost producido mediante sistemas descentralizados podría insertarse en circuitos cortos de comercialización, especialmente en comarcas

con fuerte implantación agraria, generando ingresos adicionales que refuercen la sostenibilidad económica del sistema.

No obstante, para viabilizar esta opción será necesario garantizar la calidad agronómica y sanitaria del compost, así como establecer marcos regulatorios claros que validen su distribución comercial. Según el Reglamento del Parlamento Europeo (UE, 2019/1009), solo los productos fertilizantes que cumplan requisitos específicos pueden circular libremente en el mercado europeo, lo que obliga a profesionalizar los sistemas de control de calidad y trazabilidad. En este contexto, la valorización del compost no debe entenderse exclusivamente como una transacción económica, sino como un instrumento estratégico de circularidad material, con potencial para cerrar el ciclo de los nutrientes a escala local.

5.6. HACIA UN MARCO ESTRUCTURAL DE IMPLANTACIÓN: MÁS ALLÁ DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En LMR y de los casos documentados a escala internacional, los aprendizajes de esta tesis permiten delinear las condiciones necesarias para que el compostaje comunitario descentralizado se consolide como modelo estructural de gestión de la fracción orgánica en determinados contextos territoriales. Su viabilidad ha quedado demostrada técnica, económica y socialmente, pero su escalabilidad exige ahora un entorno institucional más definido y coordinado, así como una mejora en los prototipos de la mecanización.

En primer lugar, resulta urgente consolidar un censo nacional de instalaciones descentralizadas, que permita caracterizar la infraestructura existente, evaluar su rendimiento ambiental y técnico, y orientar la planificación pública. La falta de datos consolidados limita hoy no solo el diagnóstico, sino también el diseño de políticas específicas.

El desarrollo de un marco estructural para el compostaje descentralizado requiere también del impulso coordinado de los diferentes niveles de gobierno. La consolidación de un mercado funcional no dependerá solo de la demanda municipal, sino de la capacidad del Estado y las comunidades autónomas para generar instrumentos de financiación estables, líneas de apoyo específicas y marcos regulatorios claros.

Desde el plano operativo, se identifican también oportunidades de mejora asociadas a la tecnificación del sistema. En particular, la necesidad de avanzar hacia herramientas que faciliten el seguimiento técnico, la trazabilidad y la eficiencia en la operación diaria del compostaje descentralizado. En esta línea, se plantea como posibilidad futura el desarrollo de soluciones tecnológicas específicas —como nuevos prototipos de compostadores optimizados y vehículos de apoyo con capacidades de monitoreo y registro de datos, cuyo detalle se amplía en el apartado de investigaciones futuras. Finalmente, debe recordarse que el valor del compostaje comunitario descentralizado no se limita a su eficiencia en la gestión de residuos. Su capacidad para cerrar el ciclo de nutrientes, reducir la dependencia de insumos externos y articularse con estrategias agroecológicas y climáticas lo posiciona como una herramienta transversal de transición ecológica local.

La construcción de este marco estructural exige, por tanto, una visión sistémica: articular la oferta tecnológica, la voluntad política y la participación ciudadana en una agenda común que transforme el potencial demostrado en una realidad sostenible, replicable y arraigada en el territorio.

CAPÍTULO VI

**CONCLUSIONES-
RECOMENDACIONES E
INVESTIGACIONES FUTURAS**



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

6.1. CONCLUSIONES

- La experiencia en Les Masies de Roda valida que la implementación de un sistema de compostaje comunitario descentralizado es viable incluso en contextos rurales dispersos, siempre que se cuente con un diseño técnico riguroso, herramientas de seguimiento adecuadas y una capacidad efectiva de adaptación al contexto social y operativo del territorio
- El sistema de compostaje comunitario descentralizado (SCD) constituye una alternativa técnicamente viable, económicamente sostenible y socialmente transformadora para la gestión de la fracción orgánica (FORM) en municipios de pequeña escala. El nuevo sistema de gestión de residuos del municipio de Les Masies de Roda (LMR), que utiliza el SCD como única vía de tratamiento de la FORM, ha permitido valorizar 90 t/año de residuos orgánicos municipales. Además, ha incrementado la separación en origen del 16,7 % al 28,4 % y ha evitado la recogida, transporte y tratamiento/eliminación final tanto de residuos seleccionados como no seleccionados en origen.
- El modelo SCD presenta un potencial ambiental significativo, especialmente en lo que respecta a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero frente al sistema centralizado. Diversas fuentes bibliográficas indican que, bajo ciertas condiciones, estas reducciones podrían superar el 70 %, como resultado de la eliminación del transporte a larga distancia, la menor dependencia energética y el aprovechamiento del compost como sustituto parcial de fertilizantes sintéticos. Sin embargo, es importante señalar que estos valores se basan en estudios previos y factores de emisión bibliográficos, y que su aplicabilidad puede variar considerablemente en función del contexto operativo, las condiciones climáticas y los métodos de compostaje utilizados. Además, algunos estudios han advertido que

los sistemas descentralizados, al carecer habitualmente de mecanismos de control de emisiones (como filtros o biofiltros), pueden llegar a emitir cantidades iguales o incluso superiores de ciertos gases, en comparación con instalaciones centralizadas con tecnología avanzada. Por ello, estos resultados deben interpretarse con cautela metodológica y entenderse como referencias orientativas, más que como cifras directamente extrapolables al caso analizado.

- La evaluación de seis escenarios operativos ha demostrado que los sistemas mecanizados son los más eficientes y viables desde el punto de vista técnico-económico. En particular, el escenario 3B se presenta como el más eficiente en términos de costes operativos, aunque requiere ajustes en el diseño del compostador. Por su parte, el escenario 3A resulta plenamente viable sin afectar la calidad del compost y cumple con los requisitos del Real Decreto 506/2013.
- Los costes operativos están fuertemente influenciados por la intensidad de mano de obra requerida. Los escenarios manuales demandan mayor dotación de personal y horas de trabajo, mientras que los mecanizados —en especial 3A y 3B— optimizan el recurso humano y reducen significativamente los costes salariales, consolidándose como estrategias eficaces de contención del gasto público.
- Desde el punto de vista económico, el SCD demuestra viabilidad financiera. El escenario 3A reduce costes operativos respecto al modelo anterior y permite un retorno de inversión positivo en un horizonte de entre 6 y 9 años. Además, contribuye a la economía local mediante la generación de empleo, mejorando la eficiencia del gasto público en gestión de residuos.
- Desde la dimensión social, el sistema ha generado impactos positivos en múltiples dimensiones: creación de empleo verde, promoción de igualdad de género en procesos técnicos, fortalecimiento institucional y consolidación de redes de cooperación. Se evidencia un alto nivel de aceptación ciudadana (94 %) y de conocimiento del sistema (100 %), fortaleciendo la cohesión social y la apropiación comunitaria del modelo.
- La replicabilidad del sistema se confirma para municipios con poblaciones inferiores a 1500 habitantes y una generación de FORM menor a 150 t/

año, en los que se mantengan condiciones de proximidad, gobernanza local efectiva y capacidad institucional. Este segmento representa un mercado potencial de más de 211.000 t/año en España, con al menos 32.575 t/año identificadas solo en Cataluña.

- La sostenibilidad económica del modelo se refuerza a través del retorno del canon de residuos, que permite cubrir de forma progresiva tanto los costes operativos como, en ciertos contextos, una parte significativa del CAPEX, sin necesidad de incrementar las tasas municipales. Adicionalmente, la viabilidad puede mejorar mediante el acceso a fuentes de financiación complementarias, como programas europeos orientados a la transición ecológica, el desarrollo rural o la economía circular. Esta arquitectura financiera multicanal permite que incluso municipios con capacidad fiscal limitada puedan implantar el modelo sin comprometer su equilibrio presupuestario.
- El compost generado representa una oportunidad económica adicional. En un contexto como el catalán, con más de 256.000 hectáreas de agricultura ecológica (Generalitat de Catalunya, 2023), la demanda de fertilizantes orgánicos de calidad va en aumento. Si se garantiza la calidad agronómica del producto y se establecen marcos normativos adecuados, el compost descentralizado podría comercializarse en circuitos cortos, generando nuevos flujos de ingreso y fortaleciendo la economía circular local.
- Finalmente, se concluye que el SCD puede y debe ser una vía estructural y complementaria al sistema público de gestión de residuos orgánicos, especialmente en municipios rurales, de media montaña o con baja densidad de población. En estos entornos, su implementación maximiza beneficios sociales, ambientales y económicos, contribuyendo de forma directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 5, 8, 11, 12, 13 y 17).

6.2. RECOMENDACIONES

- Incorporar el compostaje descentralizado como una opción a considerar realista en los planes municipales de gestión de residuos, especialmente en municipios de <1500 habitantes.
- Establecer marcos institucionales estables y financiación pública para la implementación, acompañamiento técnico y profesionalización del sistema.
- Desarrollar un censo regional o estatal de compostaje comunitario y doméstico, para informar políticas públicas basadas en datos reales.
- Fomentar la creación de redes intermunicipales de compostaje comunitario profesionalizado para municipios rurales sin capacidad técnica individual.

6.3. INVESTIGACIONES FUTURAS

Los resultados obtenidos en esta tesis doctoral permiten identificar diversas líneas de investigación futuras orientadas a consolidar, escalar y optimizar el compostaje comunitario descentralizado como modelo estructural para la gestión de la fracción orgánica.

- Desde una perspectiva operativa y con el fin de profesionalizar y poner al mercado una solución más compacta y optimizada de lo que se ha realizado en esta investigación, se propone, como línea de desarrollo futura, el diseño y validación de dos prototipos complementarios que permitirían avanzar hacia una gestión más eficiente y tecnificada del compostaje comunitario descentralizado. Por un lado, se plantea el desarrollo de un nuevo modelo de compostador comunitario circular, optimizado en términos de diseño ergonómico, ventilación, durabilidad y facilidad de mantenimiento, adaptado a contextos rurales y urbanos de pequeña escala. Por otro lado, se propone el diseño de un camión multifuncional, dotado de una infraestructura que permita suministrar estructurante y agua in situ, así como almacenar y registrar datos operativos y ambientales del sistema. Este vehículo actuaría como plataforma móvil de apoyo técnico, incorporando sensores para medir y registrar automáticamente los consumos de agua, estructurante y combustible durante la operación, así como sondas portátiles que

- permitan tomar y almacenar datos de temperatura, humedad y oxígeno de cada compostador atendido. Adicional a ello, el camión debe contener equipos que permitan el muestreo de gases y compost. Esta información, integrada en un sistema digital georreferenciado, facilitaría la generación de indicadores operativos, la trazabilidad del proceso y, a medio plazo, la toma de decisiones basada en datos para optimizar la eficiencia global del sistema. Estas innovaciones, aún en fase conceptual, abren una vía concreta de desarrollo tecnológico orientado a consolidar el modelo descentralizado como alternativa estructural plenamente profesionalizada y replicable.
- En cuanto a la escalabilidad y replicabilidad, se recomienda explorar modelos híbridos y estrategias de sectorización, especialmente para municipios intermedios (>1.500 habitantes) o agrupaciones intermunicipales. En este marco, se plantea como línea concreta de desarrollo tecnológico el diseño y prueba de un prototipo operativo mecanizado, tal como se anticipa en el escenario 3B y se explicó anteriormente.
 - Desde una perspectiva territorial e institucional, se propone como prioridad el diseño e implementación de un censo estatal de compostaje descentralizado, que permita caracterizar instalaciones, volúmenes tratados, tecnologías utilizadas, actores involucrados y marcos de gobernanza. Esto contribuiría a visibilizar el modelo y apoyar su incorporación formal como vía preferente de tratamiento en la planificación pública.

BIBLIOGRAFÍA

- ADEME. (2015). *Évaluation environnementale du compostage de proximité*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), Francia. <https://librairie.ademe.fr>
- ADEME. (2022). *Les chiffres clés des déchets 2022*. <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/>
- Agència de Residus de Catalunya (ARC). (2011). *Guia per al càlcul de l'impacte ambiental de la gestió dels bioresidus municipals*. Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat. Disponible en: <https://residus.gencat.cat>
- Agencia de Residuos de Cataluña. (2019). *Guia_canon_2019*.
- Agencia de Residuos de Cataluña. (2020). *Estadísticas de Residuos Municipales*. <https://residus.gencat.cat/es/inici/>
- Agència de Residus de Catalunya. (2022). *Guia d'orientació als ens locals sobre l'aplicació del retorn dels cànons sobre la disposició del rebuig dels residus municipals per a l'any 2022*.
- Agencia de Residuos de Cataluña. (2023). *Principals magnituds 2023 de la gestió de residus municipals. Dossier de dades de Catalunya*.
- Agencia de Residuos de Catalunya. (2025). *El compostaje*. https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/el_compostatge/
- Agencia de Residuos de Catalunya. (2008). *Guia del compostatge dels residus orgànics generats a les llars*. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Junta de Residus.
- Ajuntament de Les Masies de Roda. (2004). *Ajuntament de Les Masies de Roda*.
- Álvarez-Alonso, C., Pérez-Murcia, M. D., Sánchez-Méndez, S., Martínez-Sabater, E., Irigoyen, I., López, M., Nogués, I., Paredes, C., Orden, L., García-Rández, A., & Bustamante, M. Á. (2024). Municipal solid waste management in a decentralized composting scenario: Assessment of the

- process reproducibility and quality of the obtained composts. *Agronomy*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy14010054>
- Alves, D., Villar, I., & Mato, S. (2024). Community composting strategies for biowaste treatment: Methodology, bulking agent and compost quality. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 31(7), 9873–9885. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25564-x>
- Amlinger, F., Peyr, S., & Cuhls, C. (2008). Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment. *Waste Management & Research*, 26(1), 47–60.
- Andersen, J. K., Boldrin, A., Christensen, T. H., & Scheutz, C. (2012). Home composting as an alternative treatment option for organic household waste in Denmark: An environmental assessment using life cycle assessment-modelling. *Waste Management*, 32(1), 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.014>
- Andraskar, J., Yadav, S., Khan, D., & Kapley, A. (2023). Treatment options for municipal solid waste by composting and its challenges. *Journal of Indian Microbiology*, 63(3), 235–243. <https://doi.org/10.1007/s12088-023-01087-4>
- Arcas-Pilz, V., Gabarrell, X., Orsini, F., & Villalba, G. (2023). Literature review on the potential of urban waste for the fertilization of urban agriculture: A closer look at the metropolitan area of Barcelona. *Science of the Total Environment*, 905(August). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167193>
- Ashraf, A. I., Mohareb, E., & Vahdati, M. (2024). Evaluation of life cycle cost for the comparison of decentralized waste to composting and landfilling of municipal solid waste. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00409-w>
- Banco Mundial. (2018). *What a waste 2.0*.
- Barrena Gómez, F., Vázquez Lima, & Sánchez Ferrer, A. (2006). The use of respiration indices in the composting process: A review. *Waste Management and Research*, 24(1), 37–47. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062385>

- Bernstad, A., & la Cour Jansen, J. (2012). Separate collection of household food waste for anaerobic digestion: Comparison of different techniques from a systems perspective. *Waste Management*, 32(5), 806–815. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.017>
- Boletín Oficial del Estado. (2023). Real Decreto 529/2023, de 20 de junio, sobre productos fertilizantes. Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España.
- Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of garden waste management. *Waste Management*, 29(2), 645–654. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.004>
- Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H., & Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 800–812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>
- British Standards Institution. (2011). *PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. British Standards Institution. <https://shop.bsigroup.com>
- Bruni, C., Akyol, C., Cipolletta, G., Eusebi, A. L., Caniani, D., Masi, S., Colon, J., & Fatone, F. (2020). Decentralized community composting: Past, present and future aspects of Italy. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8), 3319. <https://doi.org/10.3390/SU12083319>
- Bulkeley, H., & Newell, P. (2015). *Governing climate change*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315769865>
- British Standards Institution (BSI). (2011). *PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. British Standards Institution. <https://shop.bsigroup.com>
- Bruni, C., Akyol, C., Cipolletta, G., Eusebi, A. L., Caniani, D., Masi, S., Colon, J., & Fatone, F. (2020). Decentralized community composting: Past, present and future aspects of Italy. *J. Sustainability (Switzerland)*, 12(8), 3319. <https://doi.org/10.3390/SU12083319>

- Casals Miralles, C., Barioni, D., Mancini, M. S., Petrosillo, I., & Roca, E. (2024). A footprint family-based approach to assess the environmental impacts of ecotourism packages in Mediterranean protected areas. *Tourism Planning & Development*. Publicación en línea anticipada. <https://doi.org/10.1080/21568316.2024.2300987>
- Colón, J., Martínez-Blanco, J., Gabarrell, X., Artola, A., Sánchez, A., Rieradevall, J., & Font, X. (2010). Environmental assessment of home composting. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 893–904. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.008>
- Colón, J., Cadena, E., Pognani, M., Barrena, R., Sánchez, A., Font, X., & Artola, A. (2012). Determination of the energy and environmental burdens associated with the biological treatment of source-separated municipal solid wastes. *Energy & Environmental Science*, 5, 5731–5741. <https://doi.org/10.1039/C2EE01085B>
- Lytras, C., Lyberatos, V., Lytras, G., Papadopoulou, K., Vlysidis, A., & Lyberatos, G. (2024). Development of a model composting process for food waste in an island community and use of machine learning models to predict its performance. *Waste Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02697-9>
- Council of the European Union. (1999). Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. *Official Journal of the European Communities*, L 182/1–19. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>
- U.S. Composting Council. (2015). Test methods for the examination of composting and compost (TMECC). U.S. Composting Council.
- De Baere, L., Mattheeuws, B., & Verdonck, O. (2011). *Decentralised composting: Belgian experience*. Organic Waste Systems.
- De Souza, L. C. G., & Drumond, M. A. (2022). Decentralized composting as a waste management tool connect with the new global trends: A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(12), 12679–12700. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04504-1>

- De Souza, L. C. G., & Drumond, M. A. (2023). Decentralized composting: Gated communities as ecologically promising environments. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95(3), 1–16. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320230046>
- Deng, X., Xie, C., Zhang, J., Wang, Y., Zheng, L., Ding, X., & Wu, L. (2024). Techno-economic analysis of municipal solid waste treatment for poly-generation system. *Science of the Total Environment*, 912, 168869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168869>
- Diputació de Barcelona. (2024). *Indicadores sociales: Municipis de la província de Barcelona*. Diputació de Barcelona. <https://www.diba.cat/es/web/municipis/inici/-/directori/detall/08116/08116>
- Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. (2023). *Informe resumen de las emisiones de gases de efecto invernadero (Serie 1990–2021)*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>
- Ecoinvent Association. (2021). *Ecoinvent v3.8 database documentation*. Ecoinvent. Disponible en: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The Ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). *Glosario de economía circular*. Ellen MacArthur Foundation. <https://bit.ly/3xV4lOR>
- ENT Environment & Management. (2020). *Estudi d'efectivitat dels canons de residus a Catalunya (E02_Estudi_efectivitat_canons_de_residus)*. Fundació ENT.
- Ermolaev, E., Sundberg, C., & Jönsson, H. (2014). Greenhouse gas emissions from home composting in practice and recommendations for improvement. *Waste Management*, 34(3), 567–575. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.029>

- European Commission. (2020). *Circular economy action plan*. European Commission. <https://doi.org/10.2775/855540>
- European Parliament. (2018). *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*. Official Journal of the European Union, L150/109–140. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851>
- Eurostat. (2016). *Urban Europe: Statistics on cities, towns and suburbs (2016 edition)*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2785/91120>
- Eurostat. (2025). *Municipal waste down by 19 kg per person in 2022*. Eurostat News. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240208-2>
- Evans, D. M., Campbell-Johnston, K., & Valdivia-García, M. (2013). Participation in waste management: Lessons from municipal initiatives. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 15(2), 197–213. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2012.748671>
- Favoino, E., & Hogg, D. (2008). *The potential role of composting in reducing greenhouse gases*. European Compost Network. <https://www.compostnetwork.info>
- Faverial, J., Favoino, E., & Segre, A. (2017). Comparative performance of small-scale and large-scale composting: Quality, emissions, and policy relevance. *Waste Management*, 68, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.011>
- Freire-González, J., Martínez-Sánchez, V., & Puig-Ventosa, I. (2022). Tools for a circular economy: Assessing waste taxation in a CGE multi-pollutant framework. *Waste Management*, 139, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.016>
- Fundació ENT. (2024). *The Observatory of Waste Taxation: Observatorio de Fiscalidad de los Residuos*. Fundació ENT. <https://www.fiscalidadresiduos.org/canon-residuos-cat>
- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., & Giljum, S. (2012). Integrating ecological, carbon and water footprint into a «footprint family» of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 16, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.017>

- Generalitat de Catalunya. (2023). *Agricultura ecològica a Catalunya: Dades definitives 2022*. Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural. https://agricultura.gencat.cat/web/.content/de_departament/de02_estadistiques/agricultura/agriculturaecologica/AE_2022_dades_definitives.pdf
- Generalitat de Catalunya. (2024). *El compost: Afavorim l'economia circular i lluitem contra el canvi climàtic*. Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural.
- Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, & Agència de Residus de Catalunya. (2020). *Programa de Prevenció i Gestió de Residus i Recursos de Catalunya 2020 (PRECAT20)*. Generalitat de Catalunya.
- Generalitat de Catalunya, Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural. (2024). *Petjada de carboni de la gestió dels residus municipals de Catalunya 2022*. Generalitat de Catalunya.
- Gillespie, A., & Halog, A. (2023). Community-scale composting initiatives in South-East Queensland and beyond: A review of successes, challenges and lessons for a pilot project on Karragarra Island, southern Moreton Bay. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 305–319. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00169-7>
- Gobierno Vasco & Eurostat. (2012). *Guía de compostaje doméstico y comunitario*. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/guia_compostaje/es_def/adjuntos/guia_compostaje_Pais_vasco_cast.pdf
- González, D., Barrena, R., Moral-Vico, J., Irigoyen, I., & Sánchez, A. (2024). Addressing the gaseous and odour emissions gap in decentralised biowaste community composting. *Waste Management*, 178, 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.042>
- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. CRC Press.
- Hyder Consulting. (2011). *Descriptions of waste technologies: Mechanical-biological treatment (MBT)*. Waste Authority of Western Australia. https://www.wasteauthority.wa.gov.au/images/resources/files/2019/11/Programs_-_SWIP_-_July_2013_-_Descriptions_of_waste_technologies_MBT.pdf

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 5: Waste*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, *et al.*, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, *et al.*, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- International Organization for Standardization (ISO). (2006a). *ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization (ISO). (2006b). *ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 14067:2018. Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/71206.html>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2024). *Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos. Año 2022*. INE. <https://www.ine.es>
- Institut d'Estadística de Catalunya (Idescat). (2024). *Indicadors d'estadística territorial*. Generalitat de Catalunya. <https://www.idescat.cat>
- Jefatura del Estado. (2022). *Real Decreto 529/2023, de 20 de junio, sobre productos fertilizantes*. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*, núm. 85, de 9 de abril de 2022, pp. 1–137. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-5809-consolidado.pdf>

- JRC Scientific and Technical Reports. (2011). *End-of-waste criteria for biodegradable waste subject to biological treatment (compost & digestate)*. European Commission – Joint Research Centre. <https://ec.europa.eu>
- Kupper, T., Brändli, R. C., Bachmann, H. J., Mayer, J., & Bucheli, T. D. (2017). Assessment of compost quality and its influence on greenhouse gas emissions and resource use. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.005>
- Larsen, A. W., Merrild, H., Møller, J., & Christensen, T. H. (2009). Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Management & Research*, 27(7), 652–659. <https://doi.org/10.1177/0734242X09348529>
- Ley, D. (2022). *Decreto Ley 17/2022, de 20 de diciembre, por el que se establecen medidas urgentes en materia de gestión de residuos*. Generalitat de Catalunya. <https://www.gencat.cat/dogc>
- Lin, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2018). Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.025>
- LLEI 5/2020. (2020). *Llei 5/2020, de mesures fiscals, financeres, administratives i del sector públic*. *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya (DOGC)*. <https://www.gencat.cat/dogc>
- Lu, H., Xin, Q., & Ali, E. H. (2020). Towards a better environment — The municipal organic waste management in Brisbane: Environmental life cycle and cost perspective. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120756>
- Lytras, C., Lyberatos, V., Lytras, G., Papadopoulou, K., Vlysidis, A., & Lyberatos, G. (2024). Development of a model composting process for food waste in an island community and use of machine learning models to predict its performance. *Waste Biomass Valorization*, 15(2), 987–995. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02697-9>

- Maragkaki, A. E., Sabathianakis, G., Litas, G., Poda, A., Tsompanidis, C., & Manios, T. (2023). Life cycle assessment of source separation of biowaste, pay-as-you-throw systems and autonomous composting units in the Municipality of Katerini, Greece. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(4), 2498–2512. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01708-6>
- Mathioudakis, D., Karagiannidis, A., & Tsatsarelis, T. (2021). A detailed characterization of household municipal solid waste. *Waste and Biomass Valorization*, 12(6), 2945–2957. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01260-6>
- Mazzanti, M., & Zoboli, R. (2008). Waste generation, waste disposal and policy effectiveness: Evidence on decoupling from the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1221–1234. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.003>
- Miliute-Plepiene, J., Hage, O., Plepys, A., & Reipas, A. (2016). Increasing recycling through improved understanding of waste behaviour. *Waste Management*, 54, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.027>
- Ministerio de Trabajo y Economía Social. (2024). *Guía laboral 2024*. Boletín Oficial del Estado. <https://www.boe.es>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2018). *Informe anual sobre la gestión y el tratamiento de los residuos municipales*. Gobierno de España.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2020). *España Circular 2030: Estrategia Española de Economía Circular*. Gobierno de España.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2021). *Memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2022). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero para la elaboración de inventarios nacionales sectorializados*. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores-emision.aspx>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2023). *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR)*. Gobierno de España.
- Ming, J., Zhang, L., & Wang, C. (2008). Estimation of leachate production from OFMSW composting. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.022>
- Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. *Environmental Education Research*, 25(6), 791–812. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842>
- Mostafa Imeni, S., Pelaz, L., Corchado-Lopo, C., Busquets, A. M., Ponsá, S., & Colón, J. (2019). Techno-economic assessment of anaerobic co-digestion of livestock manure and cheese whey (cow, goat & sheep) at small to medium dairy farms. *Bioresource Technology*, 291, 121872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121872>
- Nanlin, L., Xu, Y., Li, M., & Wu, H. (2023). Environmental and economic assessment of decentralized composting systems for organic municipal waste: A life cycle perspective. *Science of the Total Environment*, 896, 165260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165260>
- Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1–4), 135–160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2008). *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas*. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 312/3–30. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2018). *Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 150/109–140. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851>

- Pires, A., Martinho, G., & Chang, N. B. (2011). Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1033–1050. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.024>
- Pla territorial sectorial d'infraestructures de gestió de residus municipals de Catalunya 2013–2020 (PINFRECAT20). (2020). *Pla territorial sectorial d'infraestructures de gestió de residus municipals de Catalunya 2020 (PINFRECAT20)*. Generalitat de Catalunya.
- Puyuelo, B., Gea, T., & Sánchez, A. (2010). A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chemical Engineering Journal*, 165(1), 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.019>
- Puyuelo Sánchez, B., Nohales Duarte, G., & (Equipo editorial). (2019). *Community composting: A practical guide for local management of biowaste*. Expert in Waste Prevention and Management.
- Onwosi, C. O., Igbokwe, V. C., Odimba, J. N., Eke, I. E., Nwankwoala, M. O., Iroh, I. N., & Ezeogu, L. I. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 190, 140–157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>
- Quirós, R., Villagrà, M., Martínez, E. J., & Gómez, X. (2014). Composting of food waste: A comparison of inoculation techniques. *Waste Management*, 34(11), 2081–2087. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.017>
- Rao, J. N., & Parsai, T. (2023). A comprehensive review on the decentralized composting systems for household biodegradable waste management. *Journal of Environmental Management*, 345, 118824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118824>
- Rigamonti, L., Grosso, M., & Giugliano, M. (2010). Life cycle assessment of sub-units composing a MSW management system. *Journal of Cleaner Production*, 18(16–17), 1652–1662. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.029>
- Real Decreto 529/2023, de 20 de junio, sobre productos fertilizantes. (2023). *Boletín Oficial del Estado*, núm. 148, de 21 de junio de 2023. Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/06/20/529>

- Salas, S., Ponsá, S., & Bellaterra, S. (2010). *Different indices to express biodegradability in organic solid wastes: Application to full-scale waste treatment plants*. [Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona].
- Sánchez, A. (2022). Decentralized composting of food waste: A perspective on scientific knowledge. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 850308. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.850308>
- Sánchez, A., & Gea, T. (2025). Mass and energy balances. En A. Sánchez *et al.* (Eds.), *Composting: Fundamentals and recent advances* (pp. 80–96). Royal Society of Chemistry.
- Serafini, L. F., Feliciano, M., Rodrigues, M. A., & Gonçalves, A. (2023). Systematic review and meta-analysis on the use of LCA to assess the environmental impacts of the composting process. *Sustainability*, 15(2), 1394. <https://doi.org/10.3390/su15021394>
- Sharma, A., Soni, R., & Soni, S. K. (2024). *From waste to wealth: Exploring modern composting innovations and compost valorization*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01839-w>
- Teixeira, C. A., Ferreira, S., & Oliveira, J. F. S. (2014). Life cycle assessment of municipal solid waste management strategies: A case study in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 70, 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.036>
- The SROI Network. (2012). *A guide to Social Return on Investment*. The SROI Network / Social Value UK. <https://socialvalueuk.org>
- Torrijos, V., Calvo Dopico, D., & Soto, M. (2021). Integration of food waste composting and vegetable gardens in a university campus. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128175>
- Tudor, T., Barr, S., & Gilg, A. (2011). A review of attitude–behavior relationship in household waste management. *Waste Management*, 31(12), 2390–2400. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.016>
- U.S. Composting Council. (2015). *Test methods for the examination of composting and compost (TMECC)*. U.S. Composting Council.

- United Nations Environment Programme (UNEP) & Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). (2009). *Guidelines for social life cycle assessment of products (S-LCA)*. United Nations Environment Programme.
- Unión Europea. (2019). *Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, relativo a la puesta a disposición en el mercado de productos fertilizantes UE*. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 170/1–114.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNFCCC.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement*. UNFCCC.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.
- United Nations Environment Assembly. (2019). *Ministerial declaration of the fourth session of the United Nations Environment Assembly*. UNEA.
- Vanclay, F. (2003). *International principles for social impact assessment*. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 21(1), 5–11. <https://doi.org/10.3152/147154603781766491>
- Vázquez, M. A., Plana, R., Pérez, C., & Soto, M. (2020). Development of technologies for local composting of food waste from universities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3153. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093153>
- Vázquez, M. A., & Soto, M. (2017). The efficiency of home composting programmes and compost quality. *Waste Management*, 64, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.022>
- Villagrà, M., Quirós, R., Martínez, E. J., & Gómez, X. (2014). Composting of food waste: A comparison of inoculation techniques. *Waste Management*, 34(11), 2081–2087. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.017>

- Weidner, T., Graça, J., Machado, T., & Yang, A. (2020). Comparison of local and centralized biowaste management strategies: A spatially sensitive approach for the region of Porto. *Waste Management*, 118, 552–562. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.013>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The Ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Widyatmika, M. A., & Bolia, N. B. (2023). Understanding citizens' perception of waste composting and segregation. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(3), 1608–1621. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01636-5>
- Wilson, D. C., Velis, C., & Cheeseman, C. (2012). Role of informal sector recycling in waste management in developing countries. *Habitat International*, 30(4), 797–806. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2006.03.006>
- World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2011). *Product life cycle accounting and reporting standard*. Greenhouse Gas Protocol. <https://ghgprotocol.org/product-standard>
- Xu, M., Li, J., Zhao, H., & Zhang, T. (2023). From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting. *Environmental Research*, 229, 115977. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115977>
- Yatoo, A. M., Hamid, B., Sheikh, T. A., Ali, S., Bhat, S. A., Ramola, S., Ali, M. N., Baba, Z. A., & Kumar, S. (2024). Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: Generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(4), 4587–4608. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32669-4>
- Zheng, J., Wang, H., Chen, J., & Li, Y. (2023). Techno-economic analysis and optimization of decentralized waste treatment systems. *Waste Management*, 156, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.021>



Techno-economic evaluation of decentralized community composting as a management model to valorize organic matter in small and medium-sized towns

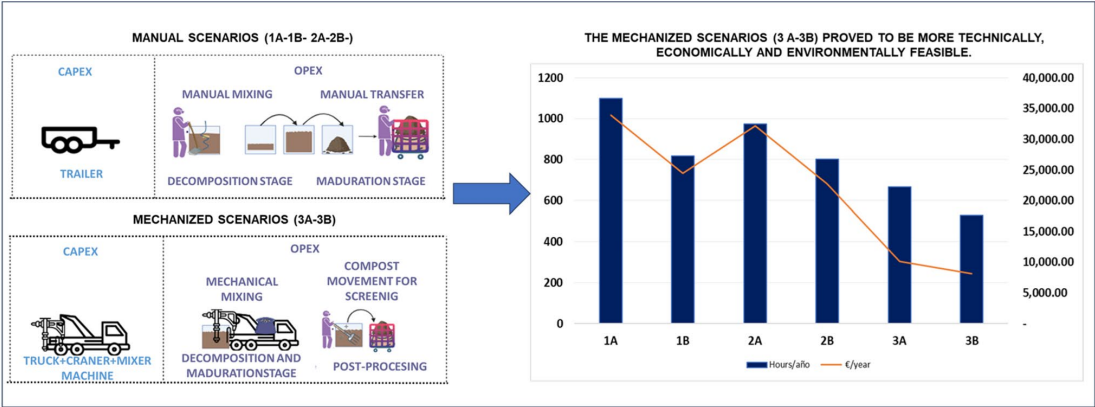
Angélica Oviedo¹ · Mabel Mora¹ · Sergio Ponsa¹ · Joan Colón¹

Received: 30 September 2024 / Accepted: 17 July 2025
© The Author(s) 2025

Abstract

Decentralized community composting presents a viable Techno-economic alternative to centralized industrial systems for managing 100% of the organic fraction of municipal solid waste (MSW) in rural municipalities. This study, conducted in Catalonia, Spain, evaluated a system capable of processing 90 t/y of organic matter under six scenarios, varying by mixing method (manual or mechanized) and the number of compost transfers. Mechanized mixing without transfers emerged as the most efficient approach, reducing processing time by 40% and labor demand by 50%, with annual operating costs of 15,141 €/year—14,325 €/year lower than manual methods. Payback was achieved in 10 years, supported by a canon return of 165–194 €/composter (5–7% discount rates). The resulting compost met Class A standards under Royal Decree 506/2013, ensuring high quality. This model aligns with European regulations, addressing 41% of Europe’s organic waste, while promoting a circular economy through localized waste valorization. Mechanization optimizes resource use, reduces costs, and enhances sustainability, offering a scalable solution for small-to-medium municipalities.

Graphical abstract



Keywords Decentralized community composting · Techno-economic assessment · Economic indicators · Organic waste management model · Municipal solid waste

Abbreviations

MSW Municipal solid waste
OFMSW Organic fraction of municipal solid waste

FW Food Waste
CCS Centralized Composting Systems
DCS Decentralized composting systems.
LMR Les Masies de Roda
CAPEX Capital Expenditure

Extended author information available on the last page of the article

FCC	Fixed capital cost
WCC	Working capital cost
OPEX	Operative Expenditure
TS	Total Solids
VS	Volatile Solids
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen
DRI	Dynamic Respiration Index
NPV	Net Present value
IRR	Internal rate of return
(IPP	Investment payback period

Introduction

Municipal solid waste (MSW) generation has surged world-wide due to population growth, economic expansion, and shifting consumption habits, reaching 2.0 billion t annually, with a projected increase to 3.4 billion t by 2050 [1]. In low-income countries, organic waste constitutes approximately 56% of total waste, leading to environmental and social issues, such as the massive generation of odors and greenhouse gas emissions, due to improper management. Landfills in these countries are particularly problematic, with over 90% of waste being openly dumped or burned, releasing significant pollutants to the atmosphere [2]. Conversely, in developed countries, the proportion of organic waste decreases to around 32%. In the case of Europe, some 90 million tons of FW (Food Waste) are generated annually. [3]

The efficient and sustainable management of municipal waste is a global environmental priority. In the EU, recycling of specific waste streams is central to the Circular Economy policies outlined in the Circular Economy Action Plan [4, 5]. The Landfill Directive [6] and the Waste Framework Directive [7] set targets to reduce waste, promote reuse and recycle biodegradable waste through sustainable technologies such as composting of the organic fraction of MSW. Bio-waste is compostable solid waste, which can be recycled locally [8] and waste sorting at source empowers the community and thus contributes to responsible waste management [9].

Organic waste composting provides notable environmental benefits, such as extending landfill lifespan, reducing space for final disposal, and recovering nutrients to reduce dependency on synthetic fertilizers. While this study does not focus on emissions, it is important to highlight that landfilling approximately 40.4% of organic waste significantly contributes to greenhouse gas emissions, particularly methane (CH₄), which has a global warming potential 28–36 times greater than CO₂ over 100 years. Composting, by contrast, minimizes these emissions, offering a more sustainable waste management alternative with lower environmental impact compared to landfilling or incineration [10–15].

The organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) is a valuable resource comprising biodegradable elements like food and plant waste [5, 16]. According to the Waste Framework Directive [7], OFMSW, comprises waste from households, restaurants, caterers, retailers, and garden/park waste. OFMSW can be treated through anaerobic or aerobic processes, producing biogas or compost, respectively [11]. Composting is an aerobic process that converts organic matter into stable steady, pathogen-free compost suitable for land application [12]. Composting systems may be categorized into centralized composting systems (CCS) and decentralized composting systems (DCS). CCS allows processing organic waste outside the city in a single industrial plant, limiting citizen involvement and the recovery of 100% of the organic matter generated [11, 17].

Decentralized community composting has emerged as a prominent alternative for managing a portion of the organic waste generated in municipalities. Numerous studies have explored its global implementation, focusing on manual static or dynamic systems [18] and, in some cases, industrial-scale mechanization [11]. Other research highlights key aspects such as citizen participation, environmental impacts, compost quality, and operational variables such as treated volumes, composter types, material mixtures, and mixing frequency [2, 19, 20]. These findings, based on a global review of successful cases in Europe, Asia, America, and Africa, involve capacities ranging from 1 to 2500 t/y of organic waste generated in specific neighborhoods or areas, as detailed in Table S1 of the supplementary data.

While these aspects are critical for advancing decentralized systems, there is a clear gap in the literature: no previous study has analyzed the techno-economic feasibility of a decentralized composting system (DCS) as the only method to treat 100% of the organic fraction generated by an entire municipality. This research fills that gap by integrating DCS into the broader complexities of municipal waste management, examining the operational and economic implications of mechanized approaches.

In alignment with the Circular Economy Action Plan [21]. The economic analysis in this study compares the costs of a previous centralized waste management model with those of a new decentralized model, evaluated under various scenarios and incorporating financial instruments such as canon return and environmental taxes. This research presents a groundbreaking approach, as it demonstrates for the first time the feasibility of treating 100% of a municipality’s organic waste through decentralized composting using mechanized systems. This innovation highlights the potential of mechanization to enable small municipalities and communities to manage organic waste autonomously and efficiently. The study aligns European regulatory requirements and offers a replicable model for similar municipalities in contexts with similar characteristics, addressing approximately

13% of the organic waste generated in Europe. This study contributes to the transition towards a circular economy, optimizing local operations and promoting the valorization of organic waste on a broader scale.

The primary objective of this research is to demonstrate the technical and economic feasibility of DCS to manage 100% of the organic waste generated in a small municipality. To achieve this, a case study was conducted in the municipality of Les Masies de Roda (Barcelona, Spain), where DCS systems were implemented and operated for three years. Economic feasibility was evaluated across six scenarios, distinguishing between the installed infrastructures and operational techniques, while also considering the regulations and taxes influencing the process.

Materials and methods

Case study location and waste composition

The present study was developed in the rural municipality of Les Masies de Roda (LMR) located in the northeast of the Iberian Peninsula, 90 km north of Barcelona. With an area of 16.41 km² and an altitude of 468 m, LMR is characterized by its agricultural and livestock activities. The population of 704 inhabitants is distributed in four neighborhoods and scattered hamlets, with a low population density of 45 people per km².

The management model before (2019) implementation of the DCS involved the selective collection and transportation of all generated fractions for subsequent centralized utilization, with residual waste disposed of in landfills. The composition and quantity of municipal waste data were obtained from official statistics provided by the Catalan Waste Agency[22], based on their in-situ characterizations, reporting a total of 331 t/year. The municipal waste was selectively collected into the following fractions: organic (55 t/y, 17%), glass (32 t/y, 10%), multiproduct (plastic, paper, and cardboard) (93 t/y, 28%), other fractions like bulky waste, electronic waste, scrap metal, vegetable oil, textile, small quantity waste and other selective collections (43 t/y, 13%), and mixed waste (mixed fraction) (107 t/y, 32%); [22] reported that out of the 107 t/y of mixed waste, 30% corresponded to OFSMW (32 t/y), which were transported to mechanical–biological treatment plants (CCS), valorizing 27 t/y of OFSMW. The remaining 5 t of organic matter that could not be valorized were sent to landfills.

The costs of the management system in LMR include selective collection, transportation, and treatment. Regarding landfill disposal costs, these are regulated by Law 17/2022 [23], which establishes an environmental tax aimed at reducing waste disposal. However, these costs can be reduced or avoided by municipalities through the return of the canon,

the value of which depends on the quantity and quality of the organic matter collected and the type of municipality. The return of the canon serves as an incentive to implement and improve selective collection and waste treatment, especially for organic matter [24]. Therefore, the management costs associated with organic matter under the previous model in LMR (collection, transportation, treatment, and environmental taxes for landfill disposal) amount to a total of 20,000€/y approximately.

Quantification of the OFMSW to be treated in the decentralized composting system.

The total organic matter generated in LMR comprises the selectively separated organic fraction (OFMSW) and the organic content in the mixed fraction. According to public statistics from the Waste Agency of Catalonia [22] OFMSW generation was 55 t/y, while 30% of the mixed fraction, equivalent to 32 t/y, was organic matter [25]. Thus, the composting system was designed to treat 90 t/y of organic matter, producing approximately 27 t/y of compost.

Data collection and analysis: Quantities of organic matter contributed by neighborhood

To estimate the quantities of organic matter generated by each neighborhood, daily records were kept of the number of bags deposited with organic waste. To calculate the average weight of each bag, these were weighed in each season of the year, thus allowing the estimates to be adjusted according to seasonal variations. The total weight of organic matter managed in each composter was obtained by multiplying the number of bags recorded by the estimated average weight per bag. The analysis revealed significant variations in organic matter inputs across neighborhoods and days of the week, influenced by factors such as population density and socioeconomic conditions. These fluctuations required the design of distinct operational scenarios, including modifications in operating frequency and a gradual transition from manual to mechanized systems. Such variations had a direct effect on the time required to manage each composter and the total volume of organic matter processed. Consequently, differentiated operating frequencies were established for each neighborhood, optimizing the efficiency and performance of the composting systems.

Physical and chemical analyses

The physical, chemical, and biological characterization of the compost samples obtained from LMR was performed per triplicate. The analyses of Total and Volatile Solids (TS, VS), moisture, organic matter content and Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) were determined according to standard

methods U.S. Composting Council, ‘Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC)’, 2015 [26] and biological stability of the compost was determined through the dynamic respirometric test. [27] On the other hand, macro elements (K and P) and heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg and Zn) were analyzed using the inductively coupled plasma Emission Spectrometry (ICP) method. (ICP-OES method C5110228) and microorganisms (bacteria, fungi and actinomycetes). These parameters were outsourced to an accredited laboratory.

Design of the composting areas and the post-treatment area

The composting area includes the contribution modules and the maturation modules. Figure 1 provides a detailed diagram of the fourteen composting sites and associated infrastructure used to manage organic matter in the four LMR neighborhoods. The infrastructure comprises composting areas (14 in total) and a post-processing center. The composting areas are distributed in the four neighborhoods of the municipality: Casas Nuevas, Esquerda, Fontanelles and Vicenç, with a total of 58 composters installed. Each composting area varies in the number of composters (1, 3, 4, 5 or 6 modules); Figures S1, S2, S3 and S4 from the supplementary information show the schematic of the modules installed according to the amount of organic matter generated by the residents of each neighborhood.

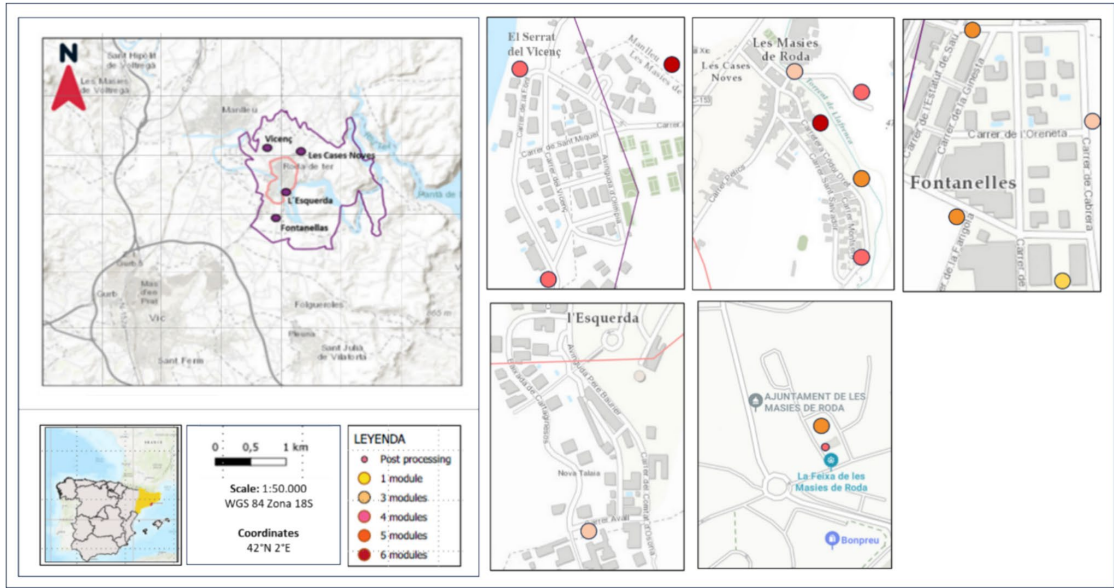


Fig. 1 Map of the distribution of composters in the municipality of Les Masies de Roda

Table 1 Variability of inputs by neighborhood and amount of organic matter managed.

Scenario by Frequency	Frequency of Operation	Neighborhood	Quantity of Fresh Organic Matter Handled per Frequency (t/weekly)	Number of Composters Agitated
A: 3 times/week per composter	Monday	1 to 5	0.8	27
	Wednesday	1 to 5	0.6	27
	Friday	1 to 5	0.5	27
B: 2 times/week per composter	Monday	2 to 5	0.77	17
	Tuesday	1	0.28	10
	Thursday	2 to 5	0.25	17
	Friday	1	0.65	10

*Neighborhood 1: Cases Noves; Neighborhood 2: l'Esquerda; Neighborhood 3: Fontanelles; Neighborhood 4: Vicenç; Neighborhood 5: Collection point.

Decentralized composting operation scenarios

Composting phases in the operation

During three years of study, six operational scenarios were evaluated in the decentralized composting system. These scenarios were defined by combining three main characteristics that affect the technical and economic performance of the process:

- 1.1.1.1.1.1. Type of operation: three levels were evaluated:
 - Manual (1): Without the use of motorized machinery.
 - Semi-manual (2): Combination of manual tools with light machinery.
 - Mechanized (3): Predominant use of machinery to carry out operational tasks.
- 2.2.2.2.2.2. Frequency of operation:
 - Three times per week (A): Higher frequency with lower intensity in operational (mixing) management.
 - Twice a week (B): Lower frequency and higher intensity (mixing), lower operating cost.
- 3.3.3.3.3.3. Number of transfers per cycle: This parameter measures the need to move materials between composters, directly affecting labor and resources required (0, 1 or 2 transfers).

The experimental design allowed a comprehensive evaluation of the operational scenarios, considering technical factors, such as composting process efficiency and compost quality, as well as economic aspects, such as operational costs and personnel allocation. This approach made it possible to analyze the impact of mechanization, optimization of the frequency of operation and the logistics associated with the transfers, providing a solid basis for the replicability and

adaptability of the model in different contexts. The scenarios were defined as taking as key variables the transfers and mixing frequency, which proved to be determinant in the performance of the composting system, as described below:

- a) Transfers: Fundamental in manual and semi-manual systems, ensure uniform oxygenation of organic matter, essential for aerobic decomposition. However, this activity requires a high physical effort and operating time. Mechanization eliminates the need for transfers by means of tools such as mixers, which optimize aeration in a single operation, significantly reducing time and effort while suggests that typical fluctuations, such as decreases in waste generation during vacations or seasonal consumption trends, have minimal impact in the context of posing scenarios improving the technical efficiency of the system.
- b) The frequency of mixing: Twice a week was more efficient than three times a week, since it allowed to distribute organic matter in terms of physical effort (18 contribution composters in one day and 10 in another), reducing the physical effort, shortening the working days and improving the quality of the mixing and treatment process.

Operational frequency analysis

Determining the operating frequencies, factors such as the amount of organic matter contributed by each neighborhood were considered. The stability of organic matter inputs throughout the seasons suggests that typical fluctuations, such as decreases in waste generation during holidays or seasonal consumption trends, have minimal impact in the context of posing scenarios. This allowed for consistent operational planning throughout the year.

Fig. 2 Transfer steps scenarios with manual mixing



Regarding neighborhood patterns, the consistent ranking of contributions across neighborhoods highlights those structural factors—such as population density and socio-economic characteristics—are more influential in organic waste generation than seasonal variations. This predictable behavior facilitates resource allocation and allows for tailored operational frequencies to meet the specific needs of each neighborhood. Further analysis of these aspects can be found in SI 2.5.1 Table 1 shows the variability in the organic matter contribution per neighborhood and its relation to the operation in terms of frequencies and mixing.

Figure 2 shows the transfer main steps and Fig. 3 illustrates the procedures followed in each scenario to perform the composting of the OFMSW generated and treated in LMR. Transfers on each composting site were conducted, involving (in general) four main steps:

Compost ready for sieving was removed from the corresponding module (generally the module in the third position) of each composting site using a roll container and big bag for its transportation. After the compost removal, a new roll container with an empty big bag was placed inside the composting module again to be ready for the next transfer. Organic matter was then transferred from the second composting module (intermediate composting stage) to the third one (first transfer). The material from the first module or input module (composting module receiving daily the fresh OFMSW) was

transferred to the second module, making the input module ready for reuse. (second transfer)

Scenarios 1A and 1B

In 1A, two workers operated composters three times per week, performing manual mixing and transfers using basic tools and roll containers. In 1B, operations occurred four times per week, alternating maintenance days to cover all composters. Tools, infrastructure, and activities were consistent across both scenarios.

Scenarios 2A and 2B

Scenario 2A introduced infrastructure changes to reduce physical effort, such as placing roll containers inside composters to eliminate one transfer while maintaining manual mixing. Operations occurred three times weekly, with two workers. In 2B, operations followed the same structure as 1B but used the adjusted infrastructure from 2A.

Scenarios 3A and 3B

In 3A, one worker operated four times weekly, using mechanical mixing via a crane-equipped truck, eliminating transfers and physical effort. Scenario 3B further optimized the process with a circular perforated iron container prototype that allowed all composting phases to occur in a single module. This innovation improved aeration and

Table 2 Detailed comparison of scenarios 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, and 3B.

SCENARIOS	TYPE OF OPERATION	MACHINERY USED	TOOLS	FREQUENCY	NUMBER OF TRANSFERS BY CYCLE	NUMBER OF PEOPLE EMPLOYED
1A	Manual	Roll Container (20), trailer (1)	Hoe, pitchfork, aireator, Big bag with buckles and Big bag with handles	Three times a week per composter	2	2
1B	Manual	Roll Container (20), trailer (1)	Hoe, pitchfork, aireator, Big bag with buckles and Big bag with handles	Three times a week per composter	2	2
2A	Semi-mechanized	Roll Container (35), trailer (1), small crane (1)	Hoe, pitchfork, aireator, Big bag with buckles and Big bag with handles	Three times a week per composter	1	2
2B	Semi-mechanized	Roll Container (35), trailer (1), small crane (1)	Hoe, pitchfork, aireator, Big bag with buckles and Big bag with handles	Three times a week per composter	1	2
3A	Mechanized	Roll Container (5), truck (1), mixer (1) crane (1)	Big bag with buckles and Big bag with handles	twice a week per composter	0	1
3B	Mechanized	Roll Container (5), truck (1), mixer (1) crane (1), Circular iron structure (56)	Big bag with buckles and Big bag with handles	twice a week per composter	0	1

homogenization, with compost extraction requiring minimal handling.

The circular iron container prototype features a top hook for crane lifting, a bottom door for discharging material into big bags, and perforated walls (1 cm²) to enhance aeration. Its circular design ensures homogenization of organic matter and prevents dead spots during mixing. In scenarios 3A and 3B, all composting phases occur within a single module. Once filled, the module is closed for ripening, and the ready-to-sift compost module becomes the new input module, eliminating transfers except for extraction and screening.

The following Table 2 presents a detailed comparison of scenarios 1A, 1B, 2A, 2B, 2A, 3A, and 3B, highlighting key operational aspects such as the number of workers, working days, equipment used, transfers, and other relevant parameters to enable a comprehensive analysis.

Figure 3 shows the tools and machinery used on stage. In scenarios 3A and 3B, when the compost is ready to be screened, it is transferred from the composter to a 500 kg big bag placed inside a rolling container, which is lifted using a removable hook attached to the truck to load and unload the material, which is then transported to the detection center. Regarding the transfer of the material to the screening area, the trailer used in the previous scenarios is replaced by the same truck, which in addition to the concrete mixer, is equipped with a crane for loading and unloading the material.

Capital and Operational expenditures

CAPEX

The capital costs (CAPEX) comprise fixed capital costs (FCC) and working capital costs (WCC). The FCC includes civil work for site preparation (composting areas, screening

facilities), installation of composters, and equipment like screening and operational machinery. WCC covers operation expenses such as raw materials, tools, structural materials, and work attire [32]. Table 3 outlines the CAPEX for each scenario, noting that civil works, post-processing site, screening machinery, shredder, tools, and supplies (e.g., compostable bags and containers) remain constant across scenarios.

OPEX

Operating expenses in all scenarios are primarily driven by personnel salaries, and second are equipment maintenance, and fuel consumption, which vary between scenarios. Electricity consumption remains constant across scenarios since the only electrically powered equipment is the compost screener, and the compost quantity is consistent.

Given the novelty of this system, time-related data were derived from field measurements. Physical effort was assessed by calculating the total number of working hours required for each activity, which was determined by multiplying the time spent per activity by its frequency and the number of personnel involved. This effort, particularly in manual tasks such as agitating organic matter and transporting compost or structural materials, generates significant physical strain. [33]

Salaries, calculated as remuneration per unit of time, represent the primary cost variable in operations. Time served as a key metric for evaluating scenarios, correlating directly with worker hours dedicated to composter operation. Manual operations (Scenarios 1A, 1B, 2A, 2B) require more labor-intensive hours compared to mechanized processes (Scenarios 3A, 3B). The total cost for each scenario was calculated by multiplying total hours by the hourly wage rate [34]

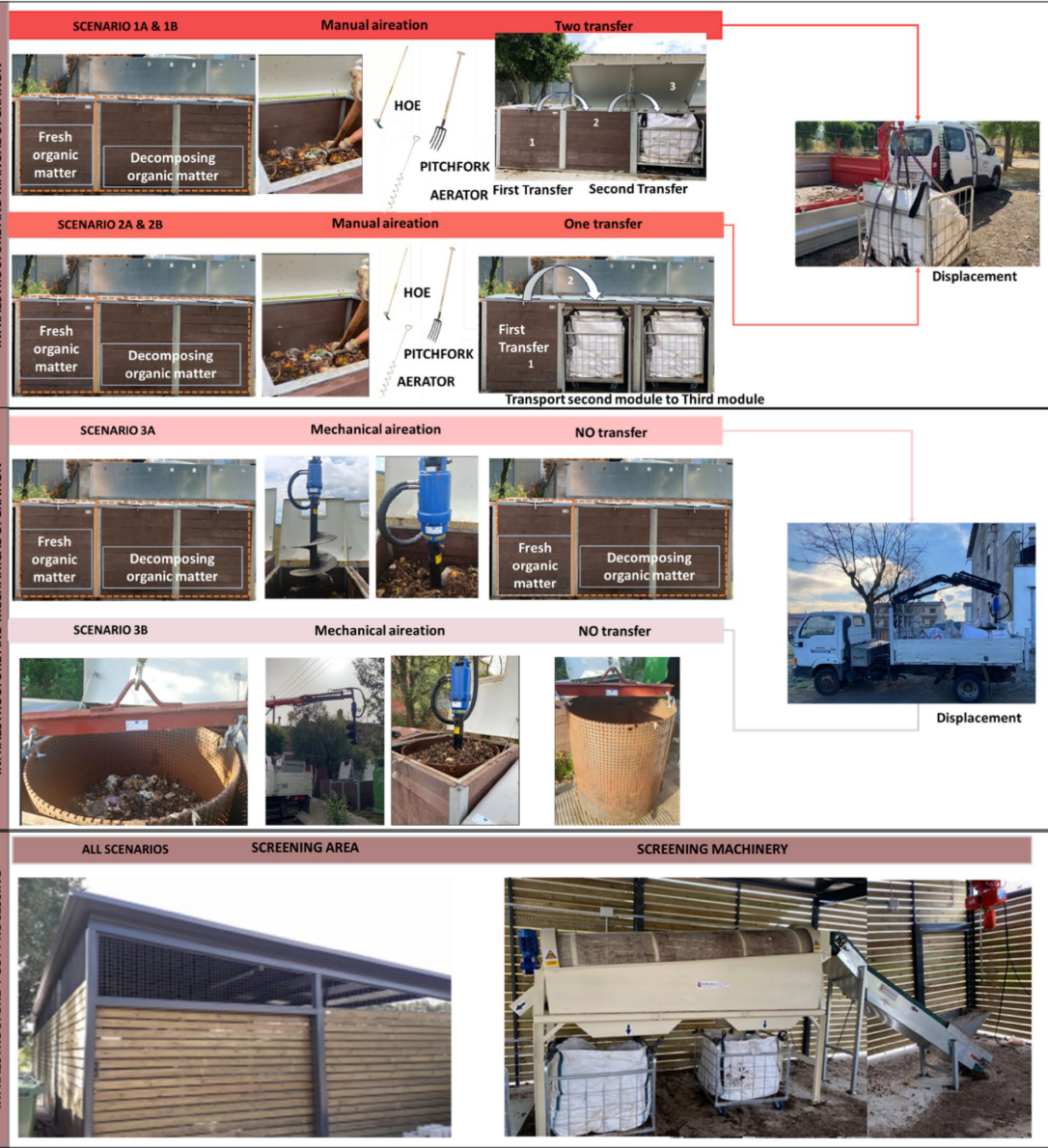


Fig. 3 Infrastructure and activities developed for each of the scenarios under study

Cost per Scenario = Hourly wage value (€) x time x n° of people (2)

The evaluation covered six scenarios over three years, starting with manual operations in scenarios 1A and 1B (two transfers), followed by scenarios 2A and 2B (manual operation with one transfer). Later, scenario 3A introduced

mechanical operation without transfers, and finally, scenario 3B refined this process. The evaluation identified high-effort activities, time per activity, and associated costs. OPEX variations across scenarios were driven by differences in personnel salaries and fuel consumption, as shown in Table 4. The CAPEX and OPEX figures reflect the actual costs incurred during the project’s execution. These costs

Table 3 Capital expenses are associated with each of the scenarios under study.

Capital costs (€)	Scenario 1.A	Scenario 1.B	Scenario 2.A	Scenario 2.B	Scenario 3A	Scenario 3B
Composting sites civil work	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550
Composter 1000L Easy Install	27,260	27,260	27,260	27,260	27,260	27,260
Circular iron structure						67,280
Workwear	993	993	993	993	993	993
Tools	500	500	500	500	500	500
RollContainer	3,700	3,700	6,475	6,475	925	925
Centralized composting warehouse	24,300	24,300	24,300	24,300	24,300	24,300
Centralized post-processing	15,195	15,195	15,195	15,195	15,195	15,195
Big bag with buckles	1,080	1,080	1,080	1,080	540	540
Big bag with handles	102	102	102	102	102	102
Household organic bins	900	900	900	900	900	900
Compostable bags	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
Pruning	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890	1,890
Mixer					2,722	2,722
Truck					10,000	10,000
Crane					22,000	22,000
Trailer	7,335	7,335	7,335	7,335		
Shredder	1,140	1,140	1,140	1,140	1,140	1,140
Total	94,445	94,445	97,220	97,220	118,517	185,797

encompass the procurement of all necessary materials and the associated labor expenses. The materials used in the project are estimated to have a service life of 15 years. To ensure the maintenance of this service life, the costs of necessary maintenance items have also been factored into the overall budget.

Taxes and savings

Environmental taxation reduces environmental pressures [35]. The Waste Agency of Catalonia has implemented economic, financial and fiscal measures to promote waste management and strengthen recycling markets [36, 37]. A key tool is the taxes for final disposal in landfills or incineration, which discourages practices with greater environmental impact by increasing their costs [38].

Additionally, there is the return of the canon, an instrument that encourages the material recovery of waste and is used to finance municipal waste management infrastructures that favor this type of recovery process, as is the case of organic matter [24]. The Governing Board of Waste Management annually establishes a “Guideline for guidance to

local authorities on the application of the return of canon on the disposal of municipal waste rejection” [38], which establishes the criteria for the distribution of the proceeds to ensure the financing of municipal waste management infrastructures [37].

The previous model, CCS (2019), consisted of separating the fractions using containers on the sidewalk, then these fractions were collected and transported to the mechanical biological treatment plant located 20 km from the municipality. The costs of this model included transportation, treatment and final disposal in a landfill per ton of each collected fraction. In this study, only the costs per ton of managed organic fraction were calculated (€20,000/year) and the return of the canon for the organic fraction at the level of Catalonia is determined by t, applying coefficients for the type of municipality (urban, semi-urban and rural) and percentage of improper waste for a refund value for return of the canon of €3,000/y. The total annual cost of the organic fraction being €17,000/year. Starting in 2020, the municipality implemented the new management model, which consists of door-to-door collection of mixed and multi-product fractions. The glass fraction continues with curbside collection

Table 4 Differences OPEX by scenario

Operating costs (€/year)	Scenario 1.A	Scenario 1.B	Scenario 2.A	Scenario 2.B	Scenario 3A	Scenario 3B
Personnel Salaries	33,922	24,483	32,183	22,744	10,158	8,146
Fuel consumption	1,027	1,027	1,027	1,027	2,400	2,400
Electrical consumption	60	60	60	60	60	60
Equipment maintenance	5,540	5,540	5,540	5,540	1,200	1,200
Pest control	254	254	254	254	254	254
Compost analytics	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069
Total	41,872	32,433	40,133	30,694	15,141	13,129

containers, and the organic fraction is separated and treated exclusively through DCS.

In 2019, the Generalitat established the return of the canon for the management of FORM through DCS as an exclusive treatment method, setting a value of €60/composter. Starting in 2022, the value of the canon returns increased to €300/composter [39]. For municipalities that demonstrate that they treat FORM exclusively and/or complementary through self-composting or community composting. The calculation is done by multiplying the number of community composters by €300/composter [38]. The economic analysis focused on a comparative assessment of the previous model against the best-case scenario of the current model, with the inclusion canon return.

Economic indicators

Net Present value (NPV): This method allows for evaluating the economic feasibility of the DCS project. It is calculated by summing up the initial investment and the present value of all future cash flows at a specified discount rate [40].

For this study, the cash flow considered is the annual savings compared with the base old OFMSW management scenario, since it considers the money saved compared to the previous situation, i.e. centralized treatment of organic matter versus decentralized treatment through community composting. Considering the savings in the reduction of operating costs, the optimization of processes and the return of the canon, we have considered the annual cash flow.

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CI - CO)t(1 + i_0)^{-t}$$
 (3)

where: CI represents cash inflows, CO represents cash outflows, *t* is time, *i*₀ is the discount rate and *n* is the project duration (15 y). The NPV calculation for the different scenarios was carried out initially with a discount rate of 5%, and subsequently with a rate of 7%, which allows us to evaluate the sensitivity of the project to variations in the discount rate.

Internal rate of return (IRR): It is a tool used to measure the profitability of the project and to analyze whether the expected profitability will be lower, equal to or higher than the cost of making that investment. It can be represented by: [40]

$$(CI - CO)t + (1 + IRR)^{-t} = 0$$
 (4)

An investment will be interesting if the value of the IRR is higher than the discount rate.

Investment payback period (IPP): This indicator reflects the time needed to recover the initial capital investment. It is calculated using the following equation. [40]

$$IPP = \frac{C_{initial}}{Annual\ Net\ Cash\ Flow}$$
 (5)

where *C*_{initial} represents the total initial investment, and the denominator corresponds to the annual net economic return. A shorter IPP indicates a more profitable and quickly recovering investment.

Limitations and assumptions of the study

The study was conducted in a Catalan municipality with approximately 704 inhabitants, managing 90 tons of organic waste annually. The model is particularly applicable to municipalities in Europe with similar population sizes and waste generation. Its viability depends on financial mechanisms such as canon returns and environmental taxes to ensure adoption and sustainability. CAPEX and OPEX costs were calculated based on Spanish market prices, considering canon returns, which vary by national policies and waste management models. Sensitivity analysis highlights that the primary economic factor is the canon return, while other factors are beyond this study's scope. Favorable aspects include minimal energy consumption, whereas rising salaries may present a challenge.

Results and discussion

Enhancements in the management system

Figure 4 illustrates the impact of transitioning from curbside collection with centralized treatment (CCS) (Sect. 2.5.2) to door-to-door collection with decentralized composting (DCS) (Sect. 3.4). Mixed waste decreased from 43 to 21%, while the organic fraction rose from 16.7% to 28.4%, enabling 100% of MSW to be composted. These gains are attributed to the integration of DCS with door-to-door collection, enhancing source separation. While this study focuses on cost evaluation in organic waste management, improved separation also yields economic benefits for other fractions. The cost analysis reveals that the DCS model eliminates treatment, disposal, and landfill taxes for the organic fraction, presenting a scalable and sustainable municipal waste management solution [22].

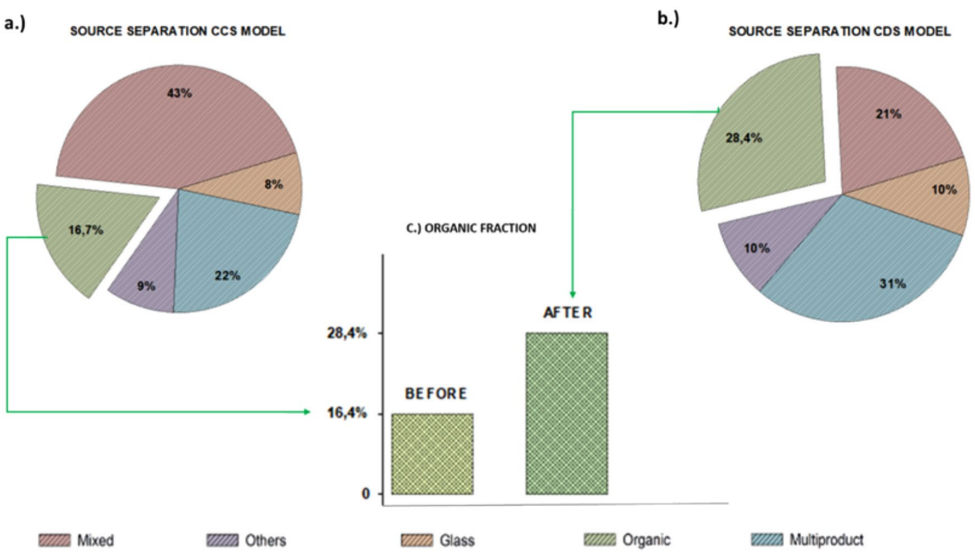


Fig. 4 Comparison of the percentage of separation at the source of the different waste fractions. **a.** Source separation with containers sidewalk and centralized organic fraction composting process. **b.** Door-to-door collection and decentralized treatment of organic matter. **c** Organic fraction difference between organic matter treated before and after community composting

Table 5 Physical–chemical properties of the compost obtained from LMR. Average value and standard deviation are presented for each parameter. Limits of the compost quality Spanish legislation are also shown.

Parameters	Average	Standard deviation	Compost quality
Physico proprieties			
Moisture* (% wb)	33	4	40% ^c
Organic matter (% db)	61	6	35 ^c
pH	8	0.04	6.0-8.5 ^a
Biological parameters			
Respiration index (mg O ₂ g ⁻¹ VS h ⁻¹)	1.6	0.61	0.50-1.5 ^a
Chemical parameters			
C/N	10	2.05	< 20 ^c
Nitrogen (N) %	3.1	0.8	3.58 ± 0.64 ^b
Cadmi (Cd)**	0.6	0.09	Class A ^c : 0.7
Coure (Cu) **	36.7	4.7	Class A ^c : 70
Chrom (Cr) **	< 10	N.A	Class A ^c : 70
Mercuri (Hg) **	< 4	N.A	Class A ^c : 1.5
Nickel (Ni) **	< 5	N.A	Class A ^c : 25
Lead (Pb) **	< 10	N.A	Class A ^c : 45
Zinc (Zn) **	277	72	Class B ^c : 500
Microbiological parameters			
Salmonella*** (presence/absence in 25 g)	nd	N.A	nd
Escherichia Coli (CFU/g)	< 10	N.A	< 10 ^c

*%wb: wet basis; dry basis- **milligrams per kilogram dry weight: mg/kg d.w-***nd: No detected.

^aAccording to California Compost Quality Council [26]

^b [42, 43]

^c Real Decreto 506 [41]

Physical and chemical properties of the obtained compost

Final compost samples from six scenarios were analyzed, with Table 5 presenting the average physicochemical properties. Organic matter content averaged 61%, due to the nature of the raw materials [19] higher than that the Royal Decree 506/2013[41] standard for commercial organic amendments but consistent with other OFMSW composting studies for example [16, 17]: VF 63.3 ± 14.2 , HF 76.8 ± 6.5 , average 65%). The pH values (7–8) and C/N ratio (10.0 ± 2.0) aligned with reported values for biowaste compost. Nitrogen content ($3.1 \pm 0.8\%$) and C/N ratios (10–12) suggest high fertilizer value, good compost maturity, and nitrogen conservation. Nutrient content matched those reported for domestic composting programs [19].

Heavy metal content placed all compost in Class A under Spanish regulations, except Zn in scenario 3, which slightly exceeded Class A limits ($< 300 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dw}$). Similar values in food waste compost are attributed to point pollution (e.g., tools, sorting, bulking agents) [18, 19]. Pathogen analysis confirmed sanitization, with no Salmonella and $< 10 \text{ cfu/g}$ fecal coliforms, meeting high-quality Class A compost standards. The final compost aligns with European Commission organic agriculture guidelines and Real Decreto 506/2013[41].

In Fig. 5a, the (DRI) values range from 0.5 to 2.5 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$, with a notable concentration in the range of 0.8 to 1.5 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$ and a peak around 1.0 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$. This value coincides with the stability threshold defined by the European Union, indicating that most of the samples meet or are close to the stability criteria. The decrease in the frequency of higher DRI values suggests a lower proportion of unstable samples, although it highlights the need for process adjustments in some specific cases. The results from the two-way ANOVA analyses provided valuable insights into the effects of various variables on compost quality, as assessed by the respiratory degradation index (IRD). The independent variables analyzed in

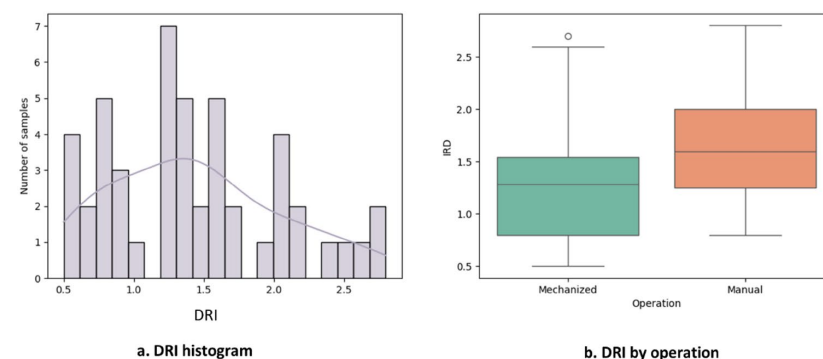
the study included retention time and external temperatures, which were categorized as cold (fall and winter seasons) and hot (spring and summer seasons). The analysis revealed that the interaction between external temperatures and retention time had a statistically significant effect on IRD, with a p-value of 0.019 (< 0.05). This suggests that while each factor alone may not have shown significant effects, their combined interaction significantly influences compost quality. This justifies the use of a two-way ANOVA to evaluate the interaction between these factors.

The results suggest that both external temperatures and retention time are key factors influencing compost quality. To replicate this model, it is crucial to adjust the retention time to approximately four months per cycle, while closely monitoring external temperatures due to their significant impact on the variability of the Respiratory Degradation Index (IRD). Longer retention times and hot conditions (spring and summer) lead to better compost quality, as indicated by the analysis results.

The second analysis carried out was a one-factor ANOVA with the variable type of operation (manual or mechanized mixing). This analysis revealed a p-value of 0.07, suggesting a trend towards significance between DRI values and type of operation. To further investigate this relationship, a boxplot (Fig. 5b) was produced, comparing manual (three mixes per week) and mechanized (two mixes per week) operations. It was observed that mechanized operation presents concentrated DRI values between 0.8 and 1.5 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$, with a median of 1.2 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$ and low variability. This indicates that mechanized mixing ensures greater consistency in compost stability. Conversely, manual operation shows a higher dispersion in values (range from 0.7 to 2.2 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$) and a higher median (1.6 $\text{mg O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$), probably due to the importance of the degree of homogeneity in the mixture, where the mechanized process ensures greater uniformity, especially in composters with low retention times.

Mechanization is positioned as a reliable and efficient alternative to produce compost closer to the stability

Fig. 5 IRD analysis, **a.** DRI Distribution, **b.** DRI by operation



standard ($\text{DRI} \leq 1.0$), minimizing variability and ensuring consistent results. This makes it especially suitable in scenarios that demand compliance with international standards and high levels of operational efficiency. When comparing centralized composting systems (CCS), DCS achieved slightly higher stability values (mean of $1.9 \pm 0.34 \text{ g}^{-1} \text{ VS h}^{-1}$) than CCS [44], but in real operating conditions it yielded a good final stability on average. Finally, in relation to the amount of compost produced, the composters produced 27 t/year (30% of the treated organic matter) consistently in all scenarios.

Techno-economic assessment of the composting scenarios

Technical assessment: key factors determining the most feasible community composting scenario

Personnel time and required frequencies Figure 6a shows on its X axis the time (hours/year) spent per operator and per activity in the community composting process; the Y axis shows the time distribution of each activity per scenario according to the way the process was carried out (manual or mechanized). As can be observed, mixing is the activity that consumes most of the time; the time spent on mixing does not vary in the scenarios whose frequency is two times a week per composter (scenarios 1B, 2B) and is greater in the scenarios that are performed with a frequency of three times a week/each per each composter (scenario 2A and 3A). As for the activity of transferring or moving materials, time starts to increase in the scenarios that are performed manually, being higher in scenarios 1A and 1B. In summary, the activities that show the greatest hourly variation between scenarios are mixing and transfers, as shown below. Although the number of transfers is the same, the

variation is due to the time required to perform the transfer, since when it is completely manual, the transfer takes longer than when it is performed with the help of equipment.

Manual handling of loads and personnel costs The operational activities identified as requiring the most manual handling of loads were mixing and transfers. In addition, it was confirmed that the physical effort determines the time it takes to perform each activity, as well as the number of people and frequency and the number of hours per activity is proportional to the cost of each of these activities, with lower costs being observed in activities whose scenarios are mechanized (3A and 3B) and higher costs in manual scenarios. Figure 6b shows the personal costs per scenario:

Mechanical versus manual scenario selection. The total annual hours for mixing and transferring were calculated considering the time it took to perform each activity according to the scenario, as well as the frequency of attention to each activity.

Related to the time spent in each composting area according to the type of operation (manual and mechanized). In manual scenarios, the transfer takes on average 113 h/year and 57 h/year, while in mechanized scenarios it takes 43 h/year and 28 h/year. Mixing in manual operation takes 732 h/year (scenarios 1A and 2A) and 477 h/year (scenarios 1B and 2B), representing 62% of the operation time. This implies health risks, while mechanization reduces operating costs and physical effort while maintaining the oxygen conditions required for the process as well as its homogeneity. Mechanized operation in scenarios 3A and 3B optimizes times, maintains quality and reduces costs (OPEX). Thus, 3A and 3B are preferred for decentralized community composting and their economic viability is considered below.

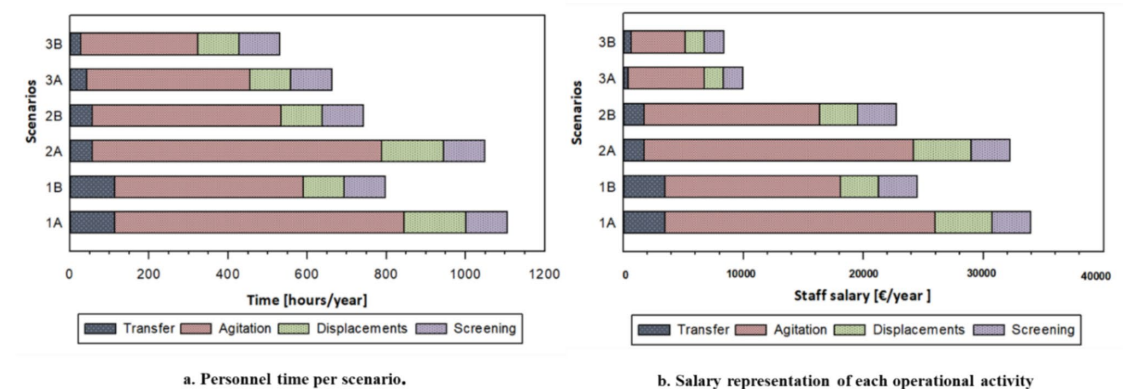


Fig. 6 Hours and salaries by scenario. **a.** Personnel time per scenario. **b.** Salary representation of each operational activity

Table 6 Scenario differences in terms of hours spent per activity, costs and money saved by frequency and type of operation.

Activity	Units	Scenario 1 A and 1B		Scenario 2 A and 2B		Scenario 3A and 3B	
		1A	1B	2A	2B	3A	3B
Number of Transfer by cycle	Transfer/cycle	2	2	1	1	0	0
**Transfer	Hours/year	113	113	57	57	43	28
**Mixing		732	477	732	477	412	295
Displacements and screening		260	208	260	208	208	208
Total		1105	798	1049	742	663	531
Personnel cost by scenario	€/year	33,922	24,483	32,183	22,744	10,158	8,146
Cost difference by frequency of manual operation							
Difference between manual scenarios €/year						9,439	
Cost savings by type of operation manual and mechanized							
Difference between 1B and 3A €/year						14,325	
Difference between 2B and 3A €/year						12,586	

*Scenarios 1A and 2A frequencies are attended three times per week/each composter and Scenarios 1B and 2B frequencies are attended twice per week/each composter.

** Scenarios 1A,1B,2A and 2B manual mixing and Scenarios 3A and 3B mechanical mixing.

These comparative differences in time, cost, and operational frequency across all scenarios are summarized in [Table 6](#).

Regardless of frequency, manual scenarios generated the highest number of hours, which in turn leads to higher personnel costs. The difference in hours in these scenarios is produced by the frequencies. As a result, the annual cost per hour spent in scenarios where composters are serviced three times per week is higher (9,439 €/y) than in those where each composter is serviced twice per week.

Key parameters influencing the economic performance of the scenarios.

Previous model

In total, the costs of transport, treatment and disposal of the organic fraction managed in the previous model correspond to the sum of that separated at source and that in the gray container, minus the return of the canon, for a total of 17,000 €/y.

Scenario 1A, 1B, 2A and 2B

The costs of each scenario are detailed in [Table 3](#). In these scenarios, with IRR = 5%, the NPV was negative (1A = -142,001. 1B = -44,028. 2A = -156,726. 2B = -58,752), since physical efforts imply a higher number of working hours, which translates into higher operating costs. This prevents them from being considered as viable alternatives for the system.

Scenario 3A

Currently, waste management uses a door-to-door collection system for mixed and multi-product fractions, and DCS for the organic fraction. The canon per composter has varied from €0 to €300 in three years. With a discount rate of 5%, an initial investment of €118,517 and OPEX of €15,141/year, a return on the canon of up to €164/composter results in a negative NPV. At €165/composter, the NPV is zero, achieving the break-even point with an IRR of 5% and an IPP of 10 years. At €168/composter, the NPV is positive. With a discount rate of 7%, the NPV is zero at €193/composter and positive at €194/composter, with an IPP of 9 years.

If the return of the canon is reduced to 165€/composter (discount rate 0f 5%), or 194€/composter (discount rate 0f 7%) and the municipality assumes the initial investment of this project, it will be enough to recover the investment in 10 years and the operating costs can continue to be assumed by the citizens with a reduction in the canon for this service since the operating costs of this model (DCS) are lower than the previous model (CCS). Another alternative is that the initial investment can be assumed by the Sectoral Territorial Plan of Municipal Infrastructures of Catalonia or by the Municipality and the operating costs are borne by the public through the waste tax.

Considering that, a return canon on the 300€/composter, with a discount rate of 5% generates a positive NPV and with an IRR 14%, IPP is equal to 7 y. and 6y with a discount rate of 7%. If the current model continues with a canon return of €300/composter there may be a risk that this will be unsustainable in the future for the

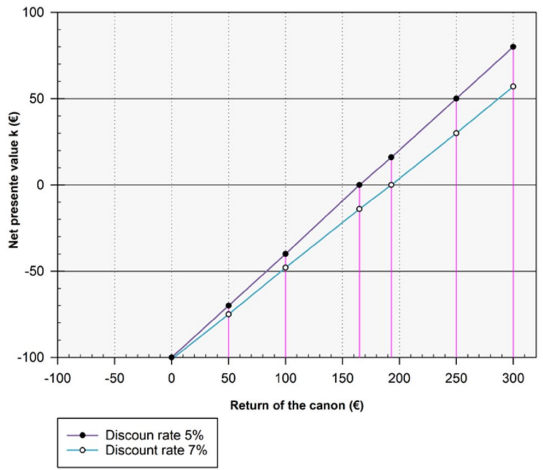


Fig. 7 Net Present value. Scenario 3A

waste agency of Catalonia, however, it is profitable for municipalities in terms of the recovery of the initial investment and annual operating costs, so it is entirely feasible to reduce the fee for this service to citizens.

Figure 7 shows the relationship between the NPV and the canon return, considering the CAPEX and OPEX of scenario 3A. The Y axis represents the variation of the NPV, from negative to positive values, expressed in thousands of euros (k €), while the X axis shows the variation of the return on the fee from zero to 300€. The lines represent the relationship of these axes with discount rates of 5% and 7%.

Scenario 3B

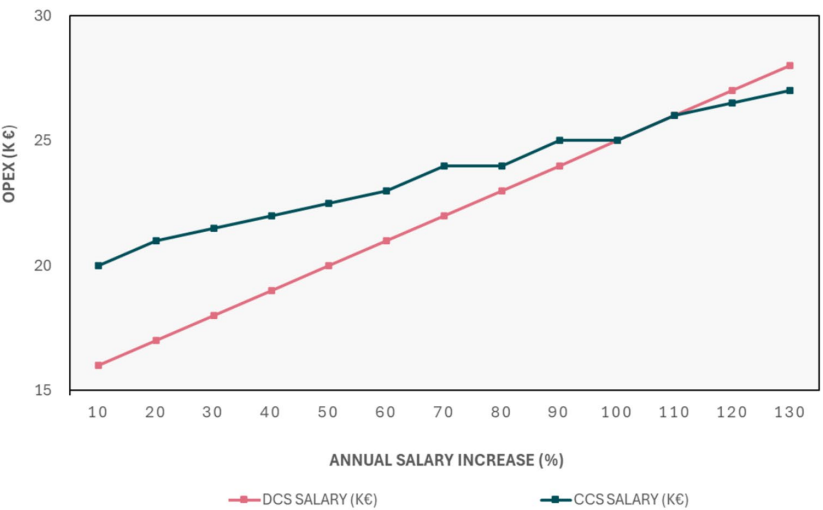
The highly mechanized scenario is the most efficient, with lower handling loads and operating costs than scenario 3A. However, it is based on an experimental design requiring further research to redesign a circular composter for easier mixer use and to include the iron drum features in Sect. 2.4. This redesign should reduce investment costs compared to this study, as it would combine previous composter and drum costs. While potentially more economical, the prototype is not market-ready, making its CAPEX costs unknown. Thus, economic indicators were calculated using scenario 3A, which is also efficient for DCS management and has moderate CAPEX costs.

Sensitivity analysis of OPEX to labor cost variations

Labor costs represent the most sensitive component of the operational expenditure (OPEX) in both composting models, accounting for 67% in the decentralized composting system (DCS) and 55% in the centralized composting system (CCS). This difference reflects the higher labor intensity of the DCS model, making it particularly vulnerable to wage increases. In contrast, although energy costs are higher in the CCS model due to greater mechanization, their influence on total OPEX remains significantly lower compared to labor costs, highlighting that fluctuations in energy prices have a more limited effect on the overall economic viability of both systems.

Figure 8 illustrates the behavior of OPEX under progressive salary increases. From a 100% increase in wages onward, the OPEX of the DCS model surpasses that of the CCS, inverting the initial economic viability relationship.

Fig. 8 Sensitivity analysis of OPEX to labor cost variations



This crossover point represents a critical threshold at which the centralized model becomes more economically favorable. The steeper slope observed in the DCS trendline confirms its greater sensitivity to labor cost fluctuations—an insight of high relevance for policymakers, particularly those operating under inflationary pressures or regulatory changes in labor conditions.

Minimum conditions for replication

The Eurostat database [45] was used to identify studies that classify population density and area typology (urban, intermediate and rural) in European Union countries. Based on these classifications, countries with rural areas that shared similar characteristics to LMR, particularly in terms of population density and typology, were selected. Based on the rural population of these countries, the total generation of municipal waste was calculated, considering an average of 513 kg per capita [46] and 28% of organic matter in waste. It was estimated that approximately 10 million t of organic matter per year, equivalent to 13% of the total generated in the European Union, could be treated by DCS in municipalities with similar characteristics. Among the countries with the greatest potential for replicability, Germany, France, Italy and Spain were identified. It should be noted that the percentage of 13% is an estimate that could vary, since not all the municipalities considered can implement the project. For further details on the methodology, can be found in SI 3.5. Table 7 summarizes this analysis, showing the potential coverage of organic waste treatment systems in relation to the total EU population of 623 million people. It distinguishes between centralized treatment systems (serving 550 million people and treating 79 Mt/year) and DCS (potentially serving 73 million rural residents and treating 10 Mt/year), resulting in an overall coverage of 100% of Europe’s organic waste.

While decentralized composting has been well-documented, this study introduces a novel approach by evaluating the feasibility of managing 100% of the organic waste

generated within a municipality. This unique approach aligns with the Circular Economy Action Plan and contributes to the EU [47, 48], which sets the target of separate collection and recycling of bio-waste by 2023. By expanding the scope of decentralized composting, this study offers a practical framework for municipalities aiming to comply with EU directives on waste management.

Conclusion

The new waste management system implemented in the municipality of LMR, which uses Decentralized Composting Systems (DCS) as the sole method to treat the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), has enabled the valorization of 90 t/year of organic waste. This system successfully increased the organic source separation from 16.7% to 28.4%, while avoiding the collection, transportation, and final disposal of both source-selected and non-source-selected OFMSW.

In terms of technical and economic feasibility, six scenarios were analyzed in this study, considering labor hours for manual (1A and 1B: 1,101 and 819 h/year) and mechanized (3A and 3B: 666 and 531 h/year) techniques. The mechanized scenarios demonstrated greater efficiency and feasibility, particularly Scenario 3A, with operating costs of 15,141 €/year, lower than the previously used model (17,000 €/year) by the municipality. This was achieved with a canon return of 165€/composter (discount rate 5%) or 194 €/composter (discount rate 7%), resulting in annual savings of 14,325 €/year compared to the manual model. Importantly, this was achieved without affecting the quality of the compost, which met the standards established in Royal Decree 506 of 2013.

Among the mechanized scenarios, Scenario 3B (mechanized with iron drum) proved to be the most cost-efficient, with operating costs of 13,129 €/year, although it requires modifications in the composter design, which would increase the CAPEX. To optimize costs, we propose the development of a circular prototype for mechanized operation, which should maintain or reduce the investment costs, making it more cost-effective than Scenario 3A (CAPEX: 34,445 €).

The findings indicate that both external temperatures and retention time play a critical role in determining compost quality. For successful replication of this model, it is essential to set the retention time close to four months per cycle, while carefully monitoring external temperatures, due to their considerable influence on the variability of the Respiratory Degradation Index (IRD). The analysis reveals that longer retention periods, combined with hot conditions (spring and summer), contribute to a higher-quality compost.

This study makes a significant contribution to the field of decentralized composting by exploring the feasibility

Table 7 Population potentially benefited and the capacity of organic matter that can be treated

Indicator	Treatment system		Total
	Centralized treatment ^a	Decentralized composting system	
Population (Million)	550	73	623
Total, organic waste (Mt/y)	79	10	89
Coverage (%)	87	13	100

^aCentralized Treatment: Composting, anaerobic digestion, incineration with energy recovery, pyrolysis and gasification, co-digestion in residual or untreated plants and landfill disposal

of managing 100% of the organic waste generated within a municipality. In alignment with the Circular Economy Action Plan and EU regulations, this approach provides valuable insights for policymakers to design sustainable waste management strategies. The study supports the transition towards a circular economy, contributing to the achievement of the EU’s sustainability goals, and serves as a replicable model for other municipalities with similar characteristics.

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1007/s10163-025-02340-2>.

Acknowledgements This paper has been carried out with the financial assistance of the European Union under the ENI CBC Mediterranean Sea Basin Program—Project grant contract number A_B.4.2_0095 “DECOST—Decentralized Composting in Small Towns. Additionally, Joan Colón has received funding from the 2018 call for Ramón y Cajal grants from the Ministry of Science, Innovation and Universities (ref. RYC-2018-026231-I) co-financed by the State Research Agency and the European Social Fund. Additionally, this work has been performed within the framework of the PhD program in experimental sciences and technologies of the University of Vic. Doctoral School—Central University of Catalonia Dr. Junyent, 1 08500 Vic, Spain, and its funding through the predoctoral grant UVIC-UCC.

Funding Open Access funding provided thanks to the CRUE-CSIC agreement with Springer Nature. Universidad Central de Catalunya, UVIC-UCC-2021, Angelica Oviedoospina,Ministerio de Ciencia,Innovación y Universidades,RYC-2018-026231-I,ENI CBC Mediterranean Sea Basin Program, A_B.4.2_0095 DECOST.

Declarations

Conflict of interest The authors declare that they have no known competing financial interests, conflicts of interest or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

1. Andraskar J, Yadav S, Khan D, Kapley A (2023) Treatment options for municipal solid waste by composting and its challenges. *J Indian Microbiol* 63(3):235–243. <https://doi.org/10.1007/s12088-023-01087-4>

2. de Souza LCG, Drumond MA (2022) Decentralized composting as a waste management tool connected with the new global trends: a systematic review. *J Environ Science Technol* 19(12):12679–12700. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04504-1>

3. Lytras C, Lyberatos V, Lytras G, Papadopoulou K, Vlysidis A, Lyberatos G (2024) Development of a model composting process for food waste in an island community and use of machine learning models to predict its performance. *Waste Biomass Valoriz.* <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02697-9>

4. Mathioudakis D et al (2021) A detailed characterization of household municipal solid waste. *Waste Biomass Valorization* 12(6):2945–2957. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01260-6>

5. Xu M et al (2023) From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting. *Environ Research* 229:115977. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115977>

6. Council of the European Union (1999) Council directive 1999/31/EC.

7. European parliament (2008) Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance).

8. Sharma A, Soni R, Soni SK (2024) From waste to wealth: exploring modern composting innovations and compost valorization. Springer. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01839-w>

9. Widyatmika MA, Bolia NB (2023) Understanding citizens’ perception of waste composting and segregation. *J Mater Cycles Waste Manag* 25(3):1608–1621. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01636-5>

10. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) Mineco, MAPAMA. España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular.

11. Bruni C et al (2020) Decentralized community composting: Past, present and future aspects of Italy. *Sustainability* 12(8):3319. <https://doi.org/10.3390/SU12083319>

12. Rao JN, Parsai T (2023) A comprehensive review on the decentralized composting systems for household biodegradable waste management. *J Environ Manag* 345:118824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118824>

13. Maragkaki AE, Sabathianakis G, Litas G, Poda A, Tsompanidis C, Manios T (2023) Life cycle assessment of source separation of biowaste, pay as you throw systems and autonomous composting units in the municipality of Katerini, Greece. *J Mater Cycles Waste Manag* 25(4):2498–2512. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01708-6>

14. Environmental Protection Agency (2024) Food Waste and Methane: What’s the Connection? Available: www.usda.gov/foodlossandwaste.

15. C. Buendia, K. Kranjc, J. Fukuda, N. S. Osako, Y. Shermanau, and P. Federici (2019) Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste Edited by Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Available: www.ipcc-nggip.iges.or.jp.

16. Lin L, Xu F, Ge X, Li Y (2018) Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: a comparative review of anaerobic digestion and composting. *J Renew Sustal Ener Rev* 89:151–167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.025>

17. Weidner T, Graça J, Machado T, Yang A (2020) Comparison of local and centralized biowaste management strategies – a spatially-sensitive approach for the region of Porto. *Waste Manag* 118:552–562. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.013>

18. Torrijos V, Calvo Dopico D, Soto M (2021) Integration of food waste composting and vegetable gardens in a university campus. *J Clean Prod* 315:128175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128175>

19. Alves D, Villar I, Mato S (2024) Community composting strategies for biowaste treatment: methodology, bulking agent and compost quality. *J Environ Sci Pollut Research* 31(7):9873–9885. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25564-x>

20. de Souza LCG, Drumond MA (2023) Decentralized composting: gated communities as ecologically promising environments.

An Acad Bras Cienc 95(3):1–16. <https://doi.org/10.1590/0001-376520230230046>

21. European parliament (2018) Directive (EU) 2018/851 of the European parliament and of the council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance).

22. Agencia de Residuos de Catalunya (2024) Estadísticas de Residuos Municipales. Available: <https://residus.gencat.cat/es/inici/>.

23. D. Ley (2022) Decreto ley 17/2022, de 20 de diciembre, por el que se establecen medidas. Available: <https://www.gencat.cat/dogc>.

24. Fundació ENT (2022) The Observatory of Waste Taxation. Available: <https://www.fiscalidadresiduos.org/canon-residuos-cat/>.

25. A. de R. Catalunya (2023) Huella de carbono de la gestión de los residuos municipales de Catalunya.

26. Composting Council US (2015) Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC). United States Composting Council, Bethesda, MD

27. Salas SP, Bellaterra S (2010) Different indices to express biodegradability in organic solid wastes. Application to full scale waste treatment plant. PhD thesis. Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelo

28. Vermican (2025) Vermican modular composter. Available: <https://ecompostaje.com/productos/compostador-modular-vermican/>.

29. Agencia de Residuos de Catalunya (2025) El compostaje. Available: https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/el_compostatge/.

30. Agencia de residuos de Catalunya (2008) Guia del compostatge dels residus orgànics generats a les llars. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Junta de Residus.

31. B. Puyuelo Sánchez, G. Nohales Duarte, and E. Science (2019) Community Composting: A Practical Guide for Local Management of Biowaste. Expert in waste prevention and management (Barcelona) 2 Community Composting: A Practical Guide for Local Management of Biowaste Contributors.

32. Zheng X et al (2023) Valorisation of food waste for valuable by-products generation with economic assessment. J Environ Manag 338:117762. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117762>

33. Ministerio de trabajo e Inmigración (2003) Manipulación manual para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la manipulación manual de cargas.

34. Ministerio de trabajo y economía social (2024) Guía laboral 2024. Boletín Oficial del Estado.

35. Freire-González J, Martínez-Sánchez V, Puig-Ventosa I (2022) Tools for a circular economy: assessing waste taxation in a CGE multi-pollutant framework. Waste Manag 139:50–59. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.016>

36. Generalitat de Catalunya (2020) LLEI 5/2020. España: Generalitat de Catalunya, pp. 1–133. Available: <https://www.gencat.cat/dogc>.

37. Pla territorial sectorial d’infraestructures de gestió de residus municipals de Catalunya 2013–2020 PINFRECAT20, (2020) Sectorial Plan territorial de infraestructuras de gestión de residuos municipales de Cataluña 2020 PINFRECAT20.

38. Agència de Residus de Catalunya (2022) Guia d’orientació als ens locals sobre l’aplicació del retorn dels cànon sobre la disposició del rebuig dels residus municipals per a l’any 2022.

39. Agencia de Residuos de Cataluña (2019) Guia_canon_2019.

40. Imeni SM, Pelaz L, Corchado-Lopo C, Busquets AM, Ponsá S, Colón J (2019) Techno-economic assessment of anaerobic co-digestion of livestock manure and cheese whey (cow, goat & sheep) at small to medium dairy farms. Bioresource Technol 291:121872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121872>

41. Boletín Oficial del Estado. Boe (2013) Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España.

42. Vázquez MA, Plana R, Pérez C, Soto M (2020) Development of technologies for local composting of food waste from universities. J Int Environ Res Public Health 17(9):3153. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093153>

43. Vázquez MA, Soto M (2017) The efficiency of home composting programmes and compost quality. Waste Manag 64:39–50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.022>

44. Barrena Gómez R, Vázquez Lima F, Sánchez Ferrer A (2006) The use of respiration indices in the composting process: a review. Waste Manag Res 24(1):37–47. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062385>

45. Eurostat (2016) Urban Europe statistics on cities, towns and suburbs 2016 edition. <https://doi.org/10.2785/91120>.

46. Eurostat (2025) Municipal waste down by 19 kg per person in 2022. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240208-2>.

47. European Commission (2020) Circular economic action plan.

48. European Commission (2018) Measuring progress towards circular economy in the European Union. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy>.

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Authors and Affiliations

Angélica Oviedo¹ · Mabel Mora¹ · Sergio Ponsa¹ · Joan Colón¹

✉ Angélica Oviedo
angelica.oviedo@uvic.cat

Mabel Mora
mabel.mora@uvic.cat

Sergio Ponsa
sergio.ponsa@uvic.cat

Joan Colón
joan.colon@uvic.cat

¹ BETA Technological Center, University of Vic – Central University of Catalonia, Carretera de Roda 70, 08500 Vic, Spain

Campañas de difusión y actividades comunitarias durante la ejecución del SCD

Durante la fase de ejecución del Sistema de Compostaje Descentralizado (SCD), se continuaron las actividades de sensibilización y comunicación, incorporando nuevas estrategias de participación. Se publicaron contenidos informativos en la página web municipal y redes sociales, reforzando el acceso digital a la información. Asimismo, se ubicaron vallas perimetrales en puntos de compostaje y se instalaron avisos en acrílico sobre el uso correcto de los compostadores, integrando el componente educativo en el espacio público. Estas acciones, complementadas por talleres en centros escolares y presentaciones en congresos sectoriales, contribuyeron a consolidar capacidades locales, fortalecer la apropiación social del sistema y avanzar en los objetivos de sostenibilidad vinculados a los ODS 11, 12 y 13, como se evidencia en estudios sobre gobernanza local participativa en la gestión de residuos (cf. Pires et al., 2011).

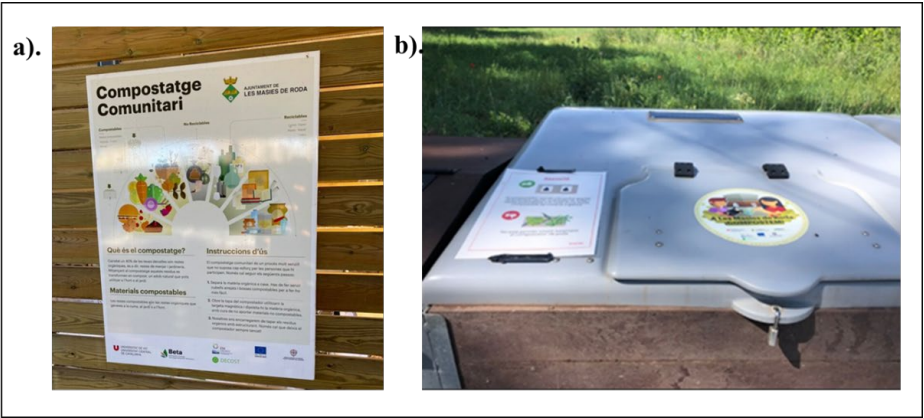


Figura A1 Señalización e infraestructura de compostaje comunitario en Les Masies de Roda

Elementos de señalización y equipamiento instalados en los puntos de compostaje comunitario del municipio. (a) Cartel informativo con instrucciones de uso, materiales permitidos y no permitidos, así como pautas para un compostaje correcto. (b), compostador comunitario con indicaciones gráficas y material educativo para reforzar la separación adecuada de la fracción orgánica. Estos recursos forman parte de la estrategia de educación ambiental y comunicación visual del proyecto, facilitando el aprendizaje autónomo de los usuarios y contribuyendo a reducir la presencia de impropios en el proceso.

4.7.2.1.2 Transferencia de conocimiento y participación escolar

Estas iniciativas fortalecen el enfoque integral del proyecto, fomentando la articulación entre comunidad, instituciones públicas y conocimiento técnico, y evidenciando el potencial de replicabilidad del modelo en otros contextos. Se realizaron acciones de transferencia de conocimiento en el sector público, incluyendo formación técnica del personal municipal del

Ayuntamiento de Les Masies de Roda, orientada a consolidar capacidades para la gestión autónoma y eficiente del compostaje comunitario. Asimismo, se desarrollaron talleres educativos en centros escolares, enfocados en temáticas de compostaje, separación de residuos y sostenibilidad ambiental, con el objetivo de integrar el aprendizaje práctico y el compromiso ambiental desde edades tempranas. Además, se compartió la experiencia del proyecto en jornadas y congresos científicos nacionales e internacionales, contribuyendo al avance de la investigación sobre gestión descentralizada de residuos orgánicos y reforzando el papel del municipio como referente de innovación en sostenibilidad local (cf. Wilson et al., 2012). Un ejemplo de esto es el El Programa SIMIL (Science Meets Regions), iniciativa que fomenta el diálogo entre ciencia y política, proporcionando soporte científico independiente en ecología y transición ecológica. Su objetivo es empoderar a las administraciones locales y regionales con herramientas para desarrollar políticas más efectivas basadas en la evidencia, la innovación y la sostenibilidad, en este caso con el acompañamiento del Centro Tecnológico BETA (UVic-UCC) en la gestión de residuos orgánicos municipales. En estas sesiones participativas del Programa SIMIL, en las que se reunieron administraciones públicas, comunidad local, técnicos y personal investigador para debatir retos y oportunidades en la gestión de residuos orgánicos en la Catalunya Central. Estas mesas de trabajo promovieron la participación activa y el intercambio de conocimientos en un marco de gobernanza colaborativa, con el objetivo de desarrollar políticas basadas en evidencia científica, innovación y sostenibilidad. El programa, coordinado por el Centro Tecnológico BETA y respaldado por el Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea, ofrece acompañamiento personalizado a cada participante para abordar problemáticas locales específicas.



Figura A2 Visita técnica al punto de compostaje comunitario y demostración de recogida en el marco del Programa SIMIL

Participantes del Programa SIMIL durante la visita guiada a las instalaciones de compostaje comunitario de Les Masies de Roda. (a). La actividad incluyó explicaciones técnicas sobre el funcionamiento de los compostadores, criterios de gestión de la fracción orgánica y procedimientos de mantenimiento, (b) seguidas de una demostración operativa de recogida con vehículo equipado con grúa.



Figura A3 Diálogo colaborativo para la mejora de la gestión de residuos orgánicos municipales

(a-b) Sesión de trabajo del Programa SIMIL, orientada a resolver retos y establecer un marco de diálogo multiactor para optimizar la gestión de residuos orgánicos en la Catalunya Central. (c) Encuentro entre profesionales de administraciones públicas locales y regionales con científicos del Centro Tecnológico BETA de la UVic-UCC, para abordar problemáticas concretas con asesoramiento técnico-científico, fortaleciendo así las políticas locales de economía circular.



Figura A3. Acciones formativas, de divulgación y sensibilización comunitaria vinculadas al SCD

(a) Presentación del proyecto SCD a la ciudadanía durante la Nit Europea de la Recerca. (b) Taller en centro educativo (c) Visita guiada de alumnado al SCD (d) Formación práctica a madres cabeza de hogar.

En cuanto a la participación educativa, se llevaron a cabo actividades, divulgativas y de capacitación desarrolladas en torno al Sistema de Compostaje Descentralizado (SCD) de Les Masies de Roda. Incluyen visitas guiadas de grupos escolares para conocer el funcionamiento del SCD y aprender la correcta separación de residuos orgánicos; talleres en centros educativos sobre el uso adecuado de los compostadores; y acompañamiento en la plantación de alimentos en huertos de instituciones educativas utilizando compost producido localmente. También se realizaron formaciones específicas para madres cabeza de hogar, orientadas al desarrollo de nuevas competencias técnicas en la operación y mantenimiento de este tipo de sistemas, fomentando la inclusión social y la generación de capacidades comunitarias. Asimismo, el proyecto fue presentado a la ciudadanía en el marco de la Nit Europea de la Recerca, donde se explicó su funcionamiento, beneficios ambientales y sociales, y su papel en la transición hacia modelos de economía circular.

