



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Propuesta metodológica para la ubicación y definición de la
tecnología de tratamiento de instalaciones de valorización y
eliminación de residuos sólidos urbanos:

Aplicación al Plan Zonal 11, Área de Gestión A6 de la
Comunitat Valenciana

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Escribano Peralta, Sergio

Tutor/a: Rodrigo Ilarri, Javier

Cotutor/a: García Segura, Tatiana

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025



PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA UBICACIÓN Y DEFINICIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE INSTALACIONES DE VALORIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: APLICACIÓN AL PLAN ZONAL 11, ÁREA DE GESTIÓN A6 DE LA COMUNITAT VALENCIANA

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR:

SERGIO ESCRIBANO PERALTA

TUTOR: JAVIER RODRIGO ILARRI

COTUTORA: TATIANA GARCÍA SEGURA

Valencia, junio de 2025

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Máster aborda el reto de definir la ubicación óptima para instalaciones de valorización y eliminación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el marco del Plan Zonal de la Vega Baja (PZ 11 – A6), en el sur de Alicante. La propuesta metodológica se fundamenta en un análisis integral que contempla aspectos históricos, normativos, técnicos y socioeconómicos y se implementa mediante la herramienta TOPSIS, permitiendo evaluar objetivamente diversas alternativas de emplazamiento.

Inicialmente, el estudio contextualiza la problemática de la gestión de RSU, resaltando el incremento histórico en la generación de desechos y la evolución de la legislación europea, nacional y autonómica. Se enfatiza cómo las normativas actuales, que incluyen directivas y reglamentos clave, apuntan a una gestión sostenible y a la transición hacia una economía circular, en la que se prioriza la reducción, el reciclaje y la reutilización de los residuos.

La investigación profundiza en las características intrínsecas de los RSU, analizando sus aspectos físicos, químicos y biológicos y la variabilidad según el contexto geográfico y socioeconómico. Este análisis permite comprender las complejidades inherentes al manejo de dichos residuos y subraya la necesidad de contar con infraestructuras adecuadas. Asimismo, se evalúan las principales tecnologías para el tratamiento de RSU, tanto las soluciones simples (por ejemplo, el tratamiento mecánico y el compostaje) como las compuestas (tratamientos mecánico-biológicos), destacando su contribución a la reducción de volumen, la recuperación de subproductos y la generación de energía.

La metodología propuesta define criterios de selección esenciales—técnicos, normativos, ambientales y económicos—que, combinados con el análisis TOPSIS, posibilitan una comparación rigurosa de distintas alternativas de ubicación. De este modo, la herramienta desarrollada se presenta como una solución práctica y adaptable, capaz de apoyar a los responsables de la planificación territorial en la toma de decisiones que garanticen una gestión integral y sostenible de los RSU.

Este trabajo no solo diagnostica la insuficiencia de infraestructuras para la gestión de residuos en la Vega Baja, sino que además ofrece una propuesta metodológica robusta y replicable. Con ello, se contribuye a la planificación y gestión ambiental, promoviendo un desarrollo sostenible en consonancia con las directrices actuales en materia de economía circular y protección del medio ambiente.

Resum

El present Treball Fi de Màster aborda el repte de definir la ubicació òptima per a instal·lacions de valorització i eliminació de Residus Sòlids Urbans (RSU) en el marc del Pla Zonal de la Vega Baixa (PZ 11 – A6), al sud d’Alacant. La proposta metodològica es fonamenta en una anàlisi integral que té en compte aspectes històrics, normatius, tècnics i socioeconòmics, i s’implementa mitjançant l’eina TOPSIS, permetent avaluar de manera objectiva diverses alternatives d’emplaçament.

L’estudi contextualitza la problemàtica de la gestió de RSU, ressaltant l’increment històric en la generació de deixalles i l’evolució de la legislació europea, nacional i autonòmica, la qual cosa impulsa una gestió sostenible orientada cap a una economia circular basada en la reducció, el reciclatge i la reutilització. A més, la recerca analitza les característiques intrínseques dels RSU (físiques, químiques i biològiques) segons el context geogràfic i socioeconòmic, i avalua les principals tecnologies aplicables, tant solucions simples (tractament mecànic, compostatge) com processos compostos (tractaments mecànic-biològics) que contribueixen a reduir el volum, recuperar subproductes i generar energia.

La metodologia proposada defineix criteris de selecció essencials —tècnics, normatius, ambientals i econòmics— que, combinats amb l’anàlisi TOPSIS, possibiliten una comparativa rigorosa de diverses alternatives d’ubicació. D’aquesta manera, l’eina desenvolupada es presenta com una solució pràctica i adaptable que dona suport als responsables de la planificació territorial per garantir una gestió integral i sostenible dels RSU.

Aquest treball no sols diagnostica la manca d’infraestructures per a la gestió dels residus a la Vega Baixa, sinó que també ofereix una proposta metodològica robusta i replicable, contribuint a una planificació i gestió ambiental que promou un desenvolupament sostenible en consonància amb les directrius actuals en economia circular i protecció del medi ambient.

Abstract

The present Master's Thesis addresses the challenge of defining the optimal location for facilities dedicated to the recovery and disposal of Urban Solid Waste (USW) within the framework of the Zonal Plan of the Vega Baja (PZ 11 – A6) in southern Alicante. The methodological proposal is based on a comprehensive analysis that considers historical, regulatory, technical, and socioeconomic aspects and is implemented using the TOPSIS tool, which enables the objective evaluation of different siting alternatives.

The study contextualizes the issue of USW management by highlighting the historical increase in waste generation and the evolution of European, national, and regional legislation. This regulatory framework drives sustainable management and a transition towards a circular economy based on waste reduction, recycling, and reuse. Additionally, the research examines the intrinsic characteristics of USW—physical, chemical, and biological—according to the geographic and socioeconomic context, and evaluates the main treatment technologies, including both simple solutions (such as mechanical treatment and composting) and composite processes (mechanical-biological treatments) that contribute to volume reduction, by-product recovery, and energy generation.

The proposed methodology defines essential selection criteria—technical, regulatory, environmental, and economic—that, when combined with the TOPSIS analysis, allow for a rigorous comparison of various siting alternatives. Thus, the developed tool is presented as a practical and adaptable solution that supports decision-makers in territorial planning, ensuring a comprehensive and sustainable management of USW.

This thesis not only diagnoses the insufficiency of waste management infrastructure in the Vega Baja but also offers a robust and replicable methodological proposal, contributing to environmental planning and management and promoting sustainable development in line with current guidelines on circular economy and environmental protection.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios por todas las bendiciones recibidas, por haber puesto en mi camino a las personas indicadas, en el momento preciso y con los conocimientos necesarios, lo que ha hecho posible la realización de este Trabajo Final de Máster.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	3
RESUM.....	4
ABSTRACT	5
AGRADECIMIENTOS	6
ÍNDICE DE GRÁFICAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. OBJETIVOS.....	15
1.2. ALCANCE.....	16
1.3. PALABRAS CLAVE.....	16
2. ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1. CONTEXTO HISTÓRICO DE LOS RSU.....	17
2.2. LEGISLACIÓN Y SITUACIÓN ACTUAL SOBRE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	18
2.2.1. <i>Introducción</i>	18
2.2.2. <i>Listado</i>	18
2.2.3. <i>Situación actual</i>	24
2.3. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LOS RSU	27
2.3.1. <i>Características físicas:</i>	28
2.3.2. <i>Características químicas:</i>	29
2.3.3. <i>Características biológicas:</i>	31
2.3.4. <i>Producción y composición RSU en la Comunidad Valenciana</i>	31
2.3.5. <i>Gestión de los RSU en la Comunidad Valenciana</i>	34
2.4. TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE RSU.....	38
2.4.1. <i>Tecnologías simples</i>	38
3. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	62
3.1. INTRODUCCIÓN.....	62
3.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO MULTICRITERIO	64
3.3. IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	65
3.4. DEFINICIÓN DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS.....	66
3.5. DETERMINACIÓN DE PESOS	76
3.6. FORMULACIÓN DE CONCLUSIONES.....	78

3.7.	CONCLUSIÓN.....	79
4.	CASO PRÁCTICO.....	80
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	80
4.2.	PLAN ZONAL DE LA VEGA BAJA DE ALICANTE (PZ 11 – A6).....	81
4.2.1.	<i>Estado actual</i>	82
4.3.	HIPÓTESIS Y CONDICIONANTES.....	86
4.4.	SELECCIÓN DEL MÉTODO	88
4.5.	IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	92
4.5.1.	<i>Alternativas de localización</i>	92
4.5.2.	<i>Alternativas de tecnologías</i>	110
4.5.3.	<i>Conclusión</i>	110
4.6.	DEFINICIÓN DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS.....	111
4.6.1.	<i>Alternativas de localización</i>	111
4.6.2.	<i>Alternativas de tecnología.</i>	116
4.7.	DETERMINACIÓN DE PESOS	131
4.7.1.	<i>Presentación de la matriz base TOPSIS.</i>	131
4.7.2.	<i>Aplicación del modelo Montecarlo.</i>	138
4.7.3.	<i>Análisis de sensibilidad de los subcriterios</i>	142
4.7.4.	<i>Conclusión</i>	153
4.8.	CONCLUSIONES.....	157
5.	CONCLUSIÓN	158
6.	LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN	160
7.	REFERENCIAS.....	161
	ANEJO: ANÁLISIS TOPSIS.....	164

Índice de gráficas

Gráfica 1. Composición RSU - Municipal. Fuente: MITECO, Ley 7/2022.	32
Gráfica 2. Composición RSU Comunidad Valenciana. Fuente: Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana.	33
Gráfica 3. Umbrales de sensibilidad del criterio económico-operacional para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.....	145
Gráfica 4. Umbrales de sensibilidad del criterio ambiental para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.	146
Gráfica 5. Umbrales de sensibilidad del criterios técnico y sociocultural para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.....	148
Gráfica 6. Umbrales de sensibilidad del criterio técnico para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.	149
Gráfica 7. Umbrales de sensibilidad del criterio sociocultural para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.	150
Gráfica 8. Umbrales de sensibilidad del criterio económico para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.	151
Gráfica 9. Umbrales de sensibilidad del criterio medio ambiental para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.	152

Índice de figuras

Figura 1. Jerarquización de los residuos. Fuente: European Commission.....	25
Figura 2. Promedio mundial y desglose regional de la composición de los RSU, 2024. Fuente: Organización Internacional del Trabajo (OIT).....	27
Figura 3. Sistema de funcionamiento para el tratamiento de los RSU. Fuente: ECOEMBES https://images.app.goo.gl/ECRr3quRumKHBQZ99	35
Figura 4. Esquema del proceso de compostaje. Fuente: Guía PXG	42
Figura 5. Proceso de compostaje. Fuente: Guía Técnica sobre la Gestión de Residuos Municipales	42
Figura 6. Compostaje en hileras con volteadora. Fuente: Rynk et al., 1992	44
Figura 7. Pila estática aireada. Fuente: Rynk et al., 1992	44
Figura 8. Reactor vertical continuo. Fuente: Microsoft Word - 2000 Compost CIEMAT.doc	45
Figura 9. Reactor vertical continuo. Fuente: Microsoft Word - 2000 Compost CIEMAT.doc	45
Figura 10. Compostaje en cajones. Fuente: COMPOSTAR DE FORMA SIMPLE EN CASA O EXTERIOR Productos Sostenibles - BIO-Degradables	45
Figura 11. Canales rectangulares de agitación. Fuente: https://ecommons.cornell.edu/items	46
Figura 12. Tambores rotativos. Fuente: https://ecommons.cornell.edu/items	46
Figura 13. Contenedor de lecho de sólidos estáticos. Fuente: https://ecommons.cornell.edu/items	46
Figura 14. Túneles estáticos. Fuente: https://ecommons.cornell.edu/items	46
Figura 15. Esquema de reacciones en la digestión anaerobia. Fuente: Guía Técnica sobre la Gestión de Residuos Municipales	48
Figura 16. Digestores sistema seco, una etapa. Fuente: http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/3105	50
Figura 17. Digestores sistema seco, una etapa. Fuente: SBR - Reactor Discontinuo Secuencial - Bioazul.	51
Figura 18. Proceso básico de biometanización. Fuente: Oxigenorik gabeko konpostajea - Konpostazank!	53
Figura 19. Aspecto típico de los CDR. Fuente: cdr290512.pdf	54
Figura 20. Tratamiento mecánico de los residuos urbanos. Fuente: cdr290512.pdf.....	55
Figura 21. Tratamiento por biosecado de los residuos urbanos. Fuente: cdr290512.pdf.....	56
Figura 22. Esquema del aprovechamiento de los RSU con incineración. Fuente: elaboración propia.	58
Figura 23. Funcionamiento del horno de parrilla. Fuente: ENERGIA A DEBATE.....	59
Figura 24. Funcionamiento del horno rotativo. Fuente: TFG, Soto Fuster.	59
Figura 25. Funcionamiento del horno mixto. Fuente: TFG, Soto Fuster.	59
Figura 26. Esquema de una planta incineradora. Fuente: TFG, Soto Fuster.	61
Figura 27. Planes Zonales de la Comunidad Valenciana. Fuente: PIRCV 2013	81
Figura 28. Mapa de la Vega Baja, comarca del PZ11 – AGA6. Fuente: Diario de la Vega.	83
Figura 29. Funcionamiento del análisis TOPSIS. Fuente: Método de Decisión Multicriterio: TOPSIS	90
Figura 30. Alternativas iniciales. Fuente: Elaboración propia.	92

Figura 31. Alternativas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 32. Localización de la Alternativa 1. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	94
Figura 33. Tendido eléctrico de la Alternativa 1. Fuente: elaboración propia.	95
Figura 34. Barranco de Ajuero de la Alternativa 1. Fuente: elaboración propia.	95
Figura 35. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 1. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	96
Figura 36. Riesgo de erosión actual y potencial de la Alternativa 1. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat.....	97
Figura 37. Localización de la Alternativa 2. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	98
Figura 38. Vista aérea de la Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.	99
Figura 39. Camino de acceso a la Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.	99
Figura 40. Riesgo de erosión actual y potencial de la Alternativa 2. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat.....	100
Figura 41. Riesgo de inundación de la Alternativa 2. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	101
Figura 42. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 2. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	101
Figura 43. Localización de la Alternativa 3. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	103
Figura 44. Orihuela. Paraje Las Pistolas. Fuente: elaboración propia.	104
Figura 45. Riesgo de erosión actual de la Alternativa 3. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	105
Figura 46. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 3. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat	105
Figura 47. Localización de la Alternativa 4. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat.	106
Figura 48. Paraje la Ermita de la Alternativa 4. Fuente: elaboración propia.....	107
Figura 49. Valores de la infiltrometría de la Alternativa 4. Fuente: Documentos oficiales de la licitación.	108
Figura 50. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 4. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat.	108
Figura 51. Riesgo de erosión actual de la Alternativa 4. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat.	109
Figura 52. Riesgo de erosión potencial de la Alternativa 4. Fuente: Visor cartogràfic de la Generalitat.....	109
Figura 53. Distribución triangular aplicada a los pesos asignados a los subcriterios de localización. Fuente: Hoja de cálculo, @Risk.	139
Figura 54. Distribución triangular aplicada a los pesos asignados a los subcriterios de tecnología. Fuente: Hoja de cálculo, @Risk.	140
Figura 55. Interfaz de simulación en @Risk: barra de herramientas, opciones de visualización y configuración del número de iteraciones. Fuente: Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.	140
Figura 56. Umbral de sensibilidad para cada alternativa de localización. Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.	141
Figura 57. Probabilidad de ocurrencia para cada alternativa de tecnología. Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.....	142

Figura 58. Probabilidad de selección de cada alternativa de localización para el peso $m = 0$ del subcriterio “Distancia de transporte”. Fuente: Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

.....143

Figura 59. Probabilidad de selección de cada alternativa de localización para el peso $M = 0,18$ del subcriterio “Distancia de transporte”. Fuente: Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

.....144

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación composición de RSU a nivel estatal con la Comunidad Valenciana. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 2. Nomenclatura utilizada para la división zonal de la Comunidad Valenciana. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 3. Resumen de las características del Compostaje. Fuente: Elaboración propia.....	43
Tabla 4. Tipología de sistemas de Compostaje. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 5. Resumen de las características de la Biometanización. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 6. Tipología de sistemas de biometanización. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 7. Tecnologías vistas en la Biometanización. Fuente: Elaboración propia	51
Tabla 8. Características de los sistemas continuos. Fuente: Elaboración propia	52
Tabla 9. Tipo de combustible en función del residuo. Fuente: Elaboración propia	54
Tabla 10. Características de la incineración. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 11. Población, superficie y RSU de los 27 municipios de la Vega Baja. Fuente: elaboración propia. 82	
Tabla 12. Comparación de técnicas multicriterio. Fuente: elaboración propia.	91
Tabla 13. Coordenadas UTM del Emplazamiento. Fuente: elaboración propia.....	102
Tabla 14. Fuentes empleadas para la elección de alternativas. Fuente: elaboración propia.....	110
Tabla 15. Tabla resumen de los resultados de las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.	115
Tabla 16. Tabla resumen de los resultados de las alternativas tecnológicas. Fuente: elaboración propia.	128
Tabla 17. Distancia al ideal positivo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.	131
Tabla 18. Matriz r_{ij}^+ del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.....	132
Tabla 19. Matriz r_{ij}^- del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.....	132
Tabla 20. Ponderación del ideal positivo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.	133
Tabla 21. Ponderación del ideal negativo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.	133
Tabla 22. Sumatorio de las distancias al ideal positivo y negativo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.	133
Tabla 23. Resultado del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.....	134
Tabla 24. Soluciones ideales del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.	135
Tabla 25. Ponderación del ideal positivo del análisis TOPSIS para las tecnologías Fuente: elaboración propia.	135
Tabla 26. Ponderación del ideal negativo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.	136

Tabla 27. Ponderación del ideal positivo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.	136
Tabla 28. Ponderación del ideal negativo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.	137
Tabla 29. Sumatorio de las distancias al ideal positivo y negativo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.	137
Tabla 30. Resultado del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.	137
Tabla 31. Resultado del análisis Montecarlo para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.	141
Tabla 32. Resultado del análisis Montecarlo para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.	142
Tabla 33. Orden de preferencia de las alternativas según el peso asignado al subcriterio “Distancia de transporte”. Fuente: elaboración propia.	144

1.INTRODUCCIÓN

La gestión adecuada de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) constituye uno de los desafíos más urgentes en el contexto actual, tanto a nivel europeo como nacional. El incremento en la generación de desechos, la presión normativa y la creciente conciencia sobre la sostenibilidad ambiental hacen imprescindible adoptar estrategias innovadoras que optimicen la gestión y minimicen el impacto ambiental. En este marco, la correcta ubicación de las instalaciones de valorización y eliminación de RSU se revela como un factor clave para lograr una gestión eficiente y respetuosa con el medio ambiente, contribuyendo a la transición hacia una economía circular.

El presente trabajo de fin de máster, desarrollado en el marco del Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia, propone una metodología innovadora basada en criterios específicos y en el análisis TOPSIS para la selección del emplazamiento óptimo. Esta propuesta metodológica se aplica al caso concreto del Plan Zonal de la Vega Baja (PZ 11 – A6), en el sur de Alicante, donde la carencia de infraestructuras adecuadas para la gestión de RSU contrasta con la exigencia de cumplir con los condicionantes europeos y las buenas prácticas establecidas en el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV).

1.1. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo se pueden distribuir en 3 puntos principales que se desarrollarán a lo largo del documento. Estos objetivos son los siguientes:

1. **Desarrollar y validar una propuesta metodológica:** Diseñar un proceso de selección basado en el análisis TOPSIS que permita evaluar de forma objetiva y comparativa las distintas alternativas de ubicación para las instalaciones de valorización y eliminación de RSU.
2. **Adaptar la metodología al contexto regional:** Aplicar la propuesta al caso del Plan Zonal de la Vega Baja (PZ 11 – A6), considerando los condicionantes territoriales, normativos y técnicos propios de la región.
3. **Fomentar la toma de decisiones sostenibles:** Contribuir a la planificación territorial mediante la integración de criterios ambientales, económicos y sociales, asegurando que la elección del emplazamiento favorezca una gestión eficiente y sostenible de los RSU.

1.2. Alcance

El estudio se centra en la evaluación comparativa de diferentes ubicaciones potenciales dentro del área del PZ 11 – A6, integrando tanto análisis cuantitativos como cualitativos. Se consideran aspectos geográficos, técnicos, normativos y socioeconómicos, con el objetivo de identificar la opción que ofrezca el mayor potencial en términos de eficiencia operativa y minimización del impacto ambiental. La metodología desarrollada pretende ser una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la planificación de infraestructuras de RSU, adaptable a otros contextos y escalable a distintas regiones, en consonancia con las directrices legales y las mejores prácticas de gestión.

Este trabajo no solo aborda la problemática de la insuficiencia de infraestructuras para la gestión de RSU en la Vega Baja, sino que también ofrece una solución metodológica integral y adaptable, orientada a impulsar un desarrollo sostenible y una gestión ambientalmente responsable.

1.3. Palabras clave

Residuos Sólidos Urbanos (RSU); Propuesta metodológica; Valorización; Eliminación; Análisis TOPSIS; Plan Zonal; Gestión; Economía circular; Sostenibilidad; Legislación; Criterios de selección; Planificación territorial; Tecnologías de tratamiento; Desarrollo sostenible.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Contexto histórico de los RSU

Desde los orígenes de la humanidad, el hombre ha generado desechos fruto de las actividades básicas necesarias para cubrir sus funciones vitales. Es por ello, que históricamente, tanto los residuos, como su gestión, se han considerado y se consideran un símbolo de relación con la sociedad, reflejando su consumo, sus desigualdades y sus transformaciones urbanas¹.

La gestión de los desechos no es un desafío contemporáneo. Apareció de forma natural con el asentamiento de poblaciones sedentarias en el Neolítico, en torno al 5000 a.C., en Mesopotamia y Egipto, donde se establecieron los primeros basureros. De igual forma, el imperio Romano construyó múltiples obras de ingeniería sanitaria (letrinas públicas, el famoso vertedero del Monte Testaccio en Roma). Durante la Edad Media, la situación insalubre de las ciudades promovió la promulgación de leyes sanitarias en el siglo XIII para mejorar las condiciones de salud pública.

La Revolución Industrial marcó un hito importante, ya que el aumento de la población y los nuevos procesos productivos incrementaron considerablemente la cantidad y diversidad de los residuos, es por ello que, durante este período, surgieron los primeros sistemas organizados de recolección de basura, y se construyeron vertederos y quemadores sin control sanitario. No es hasta el siglo XX, que se acrecienta la preocupación medioambiental generada por los residuos sólidos urbanos, cuando se establecen medidas legislativas que conforman un primer marco normativo de gestión, donde se tratan los impactos medioambientales con el fin de preservar el bienestar medioambiental sin comprometer a las futuras generaciones. En la actualidad, para enfrentar estos problemas, es necesario aplicar medidas de minimización en el origen de los residuos, evitando la creación de sustancias tóxicas y promoviendo un consumo más responsable y sostenible².

Los residuos que generaba una persona hace 500 años no son comparables a los que una persona genera actualmente, ni en cantidad, ni en composición. Según el INE, en el año 2022, en España se recogieron 23 millones de toneladas de residuos urbanos, es decir, se recogieron 482 kg de RSU/habitante/año, que es igual a 1,32 kg de RSU/habitante/día. Es por ello, que urge el cumplimiento de las normativas en materia de gestión de residuos sólidos urbanos³.

¹ <https://www.lavanguardia.com/historiayvida/20210220/6255806/historia-humanidad-contada-traves-basura.html#foto-6>.

² https://aulagaasociacion.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/1_introduccion.pdf.

³ <https://www.ine.es/dyngs/Prensa/es/CR2022.htm>.

2.2. Legislación y situación actual sobre residuos sólidos urbanos

2.2.1. Introducción

La gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se ha convertido en un aspecto estratégico en las políticas medioambientales de Europa y de sus Estados miembro. El aumento de la producción de residuos y la creciente conciencia sobre los impactos ambientales y sociales de su tratamiento han motivado una elaboración profusa de normativas que regulan tanto su gestión como su minimización. La presente legislación en este ámbito busca no solo facilitar la correcta gestión de los residuos, sino también promover la transición hacia un modelo económico más sostenible, basado en la economía circular, donde los recursos se reutilizan en lugar de desecharse.

A nivel europeo, la legislación sobre RSU ha evolucionado considerablemente. Ejemplo de ello es la Directiva 2008/98/CE sobre residuos, que fue modificada por la Directiva 2018/851 y es uno de los pilares fundamentales en la gestión de los deshechos. Asimismo, la Unión Europea ha fijado objetivos ambiciosos de reciclaje y reducción de residuos, incentivando a los países miembros a adaptar sus legislaciones para cumplir con estos compromisos. En el caso de España, la legislación sobre RSU, se materializa principalmente con la ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, la cual, alineada con las normativas europeas, establece el marco general para la gestión de residuos a nivel nacional. Marco a partir del cual las Comunidades Autónomas pueden hacer uso de sus competencias específicas para regular y gestionar los residuos siguiendo las directivas europeas y las leyes estatales. En la Comunidad Valenciana dichas competencias se concretan en la Ley 5/2022, de 29 de noviembre, de residuos y suelos contaminados para el fomento de la economía circular en la Comunidad Valenciana, el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV), etc.

A continuación, se detallarán brevemente las normativas en un listado en donde se diferencien los distintos ámbitos normativos: europeo, estatal y autonómico

2.2.2. Listado

A nivel europeo las normativas, de mayor a menor relevancia, relacionada con los RSU son⁴:

1. **Decisión nº 2381/2022/UE, relativa al VIII Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente (PAM) hasta 2030.**

Sustituye al **VII Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020**, el cual promovía una economía baja en carbono y una mayor eficiencia de recursos. El actual PAM tiene como objetivo principal alcanzar la neutralidad climática para 2050 mediante el avance en 5 áreas distintas: cambio climático, economía circular, protección de la biodiversidad y los ecosistemas, contaminación cero y salud y bienestar.

⁴ https://www.boe.es/legislacion/union_europea.php.

2. Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos

Sustituye a la **Directiva 1999/31/CE, sobre el vertido de residuos**, la cual, establecía los principios para la gestión y reducción del vertido de residuos, impulsando la valorización de residuos y la reducción de su disposición final en vertederos. Aunque la Directiva ha sido modificada y complementada con nuevas normativas, como la **Directiva 2018/851**, sigue siendo de aplicación.

3. Reglamento (UE) nº 1357/2014, de 18 de diciembre de 2014, por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE

Modifica la **Directiva 2008/98/CE** con respecto a la clasificación de residuos peligrosos, proporcionando una lista actualizada y más detallada de los residuos clasificados como peligrosos.

4. Decisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE.

Modifica la lista de residuos definida por la **Directiva 2000/532/CE**, con el fin de mejorar la claridad y la aplicación de la legislación sobre residuos peligrosos.

5. Reglamento (CE) nº 1013/2006, de 14 de junio de 2006, relativo a los traslados de residuos.

Regula el traslado de residuos dentro de la UE y hacia terceros países, estableciendo procedimientos y requisitos de control para prevenir su gestión inadecuada.

6. Reglamento (UE) nº 660/2014, de 15 de mayo de 2014, relativo a los traslados de residuos.

Modifica el **Reglamento (CE) nº 1013/2006** introduciendo novedades que suponen una ampliación y mejora de los controles y procedimientos para una gestión más segura y eficiente.

7. Directiva 94/62/CE, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases.

Establece normas sobre la gestión de residuos de envases, con el objetivo de minimizar la cantidad de residuos generados y promover el reciclaje y reutilización de envases.

8. Directiva 2004/12/CE, de 11 de febrero de 2004 y Directiva 2005/20/CE, de 9 de marzo de 2005, relativas a los envases y residuos de envases.

Modifican la **Directiva 94/62/CE** para mejorar la gestión y el reciclaje de residuos de envases, alineando los objetivos de reciclaje y recuperación con las políticas ambientales de la UE.

9. Directiva 2006/66/CE, de 6 de septiembre de 2006, relativa a las pilas y acumuladores.

Regula la gestión de pilas y acumuladores, buscando fomentar el reciclaje y la correcta disposición de estos productos al final de su vida útil.

10. Directiva 2008/12/CE, de 11 de marzo de 2008, Directiva 2008/103/CE, de 19 de noviembre de 2008 y Directiva 2013/56/UE, de 20 de noviembre de 2013.

Modifican la **Directiva 2006/66/CE** para renovar y reforzar el proceso de gestión y reciclaje de pilas y acumuladores con el fin de reducir el impacto ambiental que estas suponen.

11. Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010 , sobre las emisiones industriales

Tiene como objetivo principal prevenir y reducir la contaminación derivada de las actividades industriales, garantizando un elevado nivel de protección del medio ambiente en su conjunto. Asimismo, refuerza la transparencia, el acceso público a la información ambiental y la participación ciudadana en los procedimientos de autorización y control ambiental.

12. Directiva 2012/19/UE, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)

Regula la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, promoviendo el reciclaje, la reutilización y la reducción de la cantidad de RAEE.

13. Directiva 96/59/CE, de 16 de septiembre de 1996, relativa a la eliminación de los policlorobifenilos y de los policloroterfenilos (PCB/PCT)

Establece las normas para la eliminación de PCB/PCT y productos que los contengan, con el fin de proteger la salud y el medio ambiente. Pese a seguir en vigor, el marco normativo de la Directiva ha sido sustituido por normativas de gestión de residuos peligrosos, como la **Directiva 2008/98/CE** y la **Reglamento (CE) nº 1013/2006** sobre el traslado de residuos peligrosos.

También cabe destacar, en el ámbito europeo, la legislación referente a la prevención de contaminación de la atmósfera, aguas y suelo, relacionada con la gestión de residuos sólidos urbanos:

14. Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

Establece los valores límite para diversas sustancias contaminantes y obliga a los Estados miembros a controlar la calidad del aire, para proteger la salud humana y el medio ambiente. También cabe destacar que esta normativa modificó la **Directiva 2004/107/CE, de 15 de diciembre de 2004**, relativa a la regulación de los metales tóxicos, y ha sido modificada por: la **Directiva 2015/1480/UE**, la **Directiva (UE) 2016/2284** y la **Directiva (UE) 2021/2131**, para actualizar los límites de contaminantes.

15. Directiva 2010/75/UE, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)

Regula las emisiones de gases y contaminantes derivados de las actividades industriales, promoviendo el uso de mejores tecnologías disponibles para reducir la contaminación en el aire, el agua y el suelo. Asimismo, dicha directiva regula la incineración de residuos, es por ello, que sustituye a la **Directiva de 2000/76/CE**.

16. Directiva 2004/35/CE, de 21 de abril de 2004, sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales.

Siguiendo el principio “Quien contamina paga”, establece un marco de responsabilidad para las empresas y otras entidades, en el que se exige la toma de medidas correctoras ante daños ambientales en la biodiversidad, agua o suelo.

A nivel nacional, las normativas más relevantes para el caso español son las siguientes⁵:

1. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.

Establece el marco normativo en España para la gestión de residuos y la descontaminación de suelos, alineándose con las **directivas europeas** sobre residuos y economía circular.

2. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2024-2035, de 22 de enero de 2025.

Establece medidas más estrictas para la reducción, reutilización y reciclaje de residuos y se centra en la prevención de residuos y la minimización de su impacto en el medio ambiente para consolidar el modelo de economía circular. Sustituye al **PEMAR 2016-2022**.

3. Plan Nacional de Prevención de Residuos 2021-2025, de 30 de diciembre de 2020.

Su objetivo principal es reducir la cantidad de residuos generados en España, promoviendo prácticas de prevención y minimización de residuos en todos los sectores.

4. Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, relativa a la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Regula el depósito de residuos en vertederos, estableciendo las condiciones y requisitos que deben cumplir los vertederos para garantizar una correcta gestión y minimizar el impacto ambiental.

5. Ley 5/2013, de 11 de junio, de residuos y suelos contaminados.

Modifica la **Ley 22/2011** y la **Ley 16/2002** para mejorar la gestión de residuos y la prevención de la contaminación del suelo, mediante la regulación de las actividades contaminantes a nivel nacional y las actividades sujetas a impuestos.

6. El Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, relativo a eliminación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Regula la prevención y reducción de los impactos adversos causados por la generación y la gestión de los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos sobre la salud humana y el medio ambiente

7. Real Decreto 710/2015, de 24 de julio, relativo a la gestión ambiental de los residuos de pilas y acumuladores.

⁵ <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/planes-y-programas.html>.

Modifica el **Real Decreto 106/2008**, (en vigor) de 1 de febrero y asegura la responsabilidad de los productores tanto en la introducción de productos en el mercado, como en la gestión de los residuos generados por esos productos al final de su vida útil.

8. Orden de 5 de diciembre de 2002, por la que se regula el modelo de la Declaración Anual de envases y residuos de envases

Establece un sistema que permite a los productores de envases y productos envasados informar sobre la cantidad y tipo de envases que han puesto en el mercado, así como sobre los residuos que han generado a partir de esos envases. Esta Orden complementa y regula aspectos de algunas leyes que ya están derogadas, como: **Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases**, **Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados** y **Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se regula la gestión de los residuos de envases**.

9. Orden 3/2013, de 25 de febrero, relativa al impuesto de eliminación de residuos en vertederos.

Permite la aplicación del impuesto sobre la eliminación en vertederos a aquellos que no son susceptibles de valorización, con el objetivo de optimizar la gestión de residuos, aumentar el reciclaje y reducir la cantidad de residuos que se eliminan en vertederos.

10. Real Decreto 1304/2009, de 27 de diciembre, relativo a la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero.

Establece las condiciones para la correcta gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) para minimizar sus impactos ambientales y promover su reciclaje y reutilización. Este real decreto, junto con la **Orden AAA/661/2013, de 18 de abril**, modifican el **Real Decreto 1481/2001**, ya derogado.

En relación la legislación para prevenir la contaminación de la atmósfera, aguas y suelo español:

11. Ley 34/2007, de 15 de noviembre, relativa a la calidad del aire y protección de la atmósfera.

Regula la calidad del aire mediante su monitorización y control. Asimismo, establece los límites para la concentración de contaminantes en la atmósfera y las medidas para la reducción de la contaminación atmosférica.

12. Real Decreto 678/2014, de 1 de agosto, relativo a la mejora de la calidad del aire.

También regula las mediciones de calidad del aire y la información al público sobre los niveles de contaminación, pero de forma novedosa, actualiza los valores límite para ciertos contaminantes y establece la obligación de realizar planes de calidad del aire en las zonas donde se superen los límites establecidos para ciertos contaminantes. Modifica el **Real Decreto 102/2011, de 28 de enero**.

13. Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002.

Desarrolla aspectos específicos de las emisiones industriales, así como su control y monitorización en dichas instalaciones, promoviendo la mejor tecnología disponible (MTD) para reducir las emisiones.

14. Real Decreto 687/2011, de 13 de mayo, relativo a los agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión

Modifica el Real Decreto 430/2004, actualizando y mejorando los límites de emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de instalaciones de gran combustión.

A nivel autonómico, las normativas más relevantes para el caso de la Comunidad Valenciana son:

1. Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV)

El PIRCV es la principal herramienta de planificación y gestión de los residuos en la Comunidad. La última versión vigente es el **PIRCV 2020-2030**, aprobado en 2020, es por eso, que cabe hacer una mención las distintas versiones y cómo han ido evolucionando:

- PIRCV 1997: Primer plan de residuos.
- PIRCV 2002: Primera actualización del plan de residuos.
- PIRCV 2008: Adaptación a la **Directiva Europea 2008/98/CE** e introduce la economía circular.
- PIRCV 2010: Revisión y ajustes, enfatizando en la prevención y el reciclaje de los residuos.
- PIRCV 2015: Impulsa la economía circular, favoreciendo el reciclaje y mejora de infraestructuras.
- PIRCV 2021-2025: Adaptación a las normativas más recientes y enfoque claro en la reducción de residuos y la economía circular.

Esta Plan establece los objetivos para la gestión de residuos en la región, destacando los principios de la economía circular, el reciclaje y la reducción de residuos. Entre sus propósitos se incluye el reducir la cantidad de residuos enviados a vertedero, aumentar las tasas de reciclaje y fomentar la reutilización.

2. Ley 5/2022, de 29 de noviembre, de residuos y suelos contaminados para el fomento de la economía circular en la Comunidad Valenciana

Establece el marco normativo para la gestión de residuos y la descontaminación de suelos en la Comunidad Valenciana. El objetivo principal es fomentar la economía circular, promoviendo la reducción, reutilización y reciclaje de residuos.

3. Orden 3/2013, de 25 de febrero, relativa a los efectos del impuesto sobre eliminación de residuos en vertederos.

Establece la relación de residuos que pueden ser objeto de valorización, promoviendo la minimización de residuos en vertederos y la recuperación de materiales. Esta Orden se encuentra en el contexto europeo, con el **Reglamento (UE) nº 1357/2014** y la **Directiva 2008/98/CE**.

4. Decreto Ley 4/2016, de 10 de junio, relativo a las medidas de gestión de residuos municipales.

Establece medidas urgentes para garantizar que los residuos municipales sean gestionados adecuadamente en situaciones de emergencia.

5. Orden 11/2012, de 26 de diciembre, relativa a la regulación de actividades contaminantes.

Regula el censo de instalaciones y contribuyentes y establece las declaraciones de alta, de modificación y de cese de las actividades sujetas al impuesto sobre actividades que inciden en el medio ambiente. Con el objetivo de definir un marco de control y fiscalización de las actividades contaminantes en la Comunidad Valenciana.

2.2.3. Situación actual

Una vez desarrollado el marco normativo sobre la gestión de residuos sólidos urbanos, en los distintos ámbitos de aplicación: europeo, nacional y autonómico, se evidencia la relación jerárquica de dichas normas, donde las leyes autonómicas deben ser compatibles con las nacionales y europeas. Estas últimas poseen una jerarquía superior sobre la legislación de sus Estados miembros, por lo tanto, influyen directamente sobre la legislación española. Es por ello, que para sintetizar la situación actual en materia de RSU se va a recurrir principalmente a la versión actualizada de la **Directiva Marco Europea (8/02/2024)**.

El objetivo general de implantar un marco normativo tan riguroso responde a la necesidad de proteger la salud humana y preservar el medio ambiente, garantizando una gestión preventiva y un control eficaz de los residuos que no comprometa el bienestar de las generaciones futuras. El incremento en la producción de residuos, impulsado por el modelo de consumo, los avances tecnológicos y la globalización comercial, ha dado lugar a una mayor cantidad, diversidad y potencial toxicidad de los desechos, lo que exige abordajes integrales para evitar impactos adversos sobre los ecosistemas. Con el fin de reducir al máximo la generación de residuos y articular sistemas de gestión eficientes, esta filosofía se apoya en tres principios clave:

Primeramente, establece la segmentación de las posibles actuaciones empleadas para gestionar los RSU de forma ordenada, es decir, la **jerarquización de los residuos** ([Figura 1](#)). Para ello, es menester definir previamente los conceptos claves en materia de residuos que aparecen en el Artículo 3 y 4 de la directiva:

Residuo: cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse.

Gestión de residuos: la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.

Prevención: medidas adoptadas antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en residuo, para reducir: la cantidad de residuo, incluso mediante la reutilización de los productos o el alargamiento de la vida útil de los productos; los impactos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana de la generación de residuos, o el contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.

Reutilización: cualquier operación mediante la cual productos o componentes que no sean residuos se utilizan de nuevo con la misma finalidad para la que fueron concebidos.

Tratamiento: las operaciones de valorización o eliminación, incluida la preparación anterior a la valorización o eliminación.

Valorización: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general.

Reciclado: toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

Eliminación: cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía.



Figura 1. Jerarquización de los residuos. Fuente: European Commission.

En segundo lugar, dicha filosofía busca implantar el principio de **mejora continua en la gestión de residuos** mediante la inclusión de la recogida selectiva, el reciclaje y el vertido controlado en vertederos. Este progreso puede alcanzarse mediante el desarrollo de infraestructuras adecuadas y la transparencia y accesibilidad de la información, de modo que las políticas puedan ser evaluadas y mejoradas periódicamente.

En tercer lugar, **fomenta la economía circular** donde los materiales se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, reduciendo la cantidad de residuos generados y favoreciendo el reciclaje y la reutilización.

No obstante, para que este modelo de producción y consumo necesita otorgar parte de la responsabilidad al productor de residuos.

La filosofía que actúa sobre el marco normativo de la Comunidad Valenciana, España y Europa, incentiva un modelo de gestión de residuos más sostenible, que minimiza la generación de residuos, favorece el reciclaje y la reutilización, y reduce los impactos negativos sobre la salud y el medio ambiente.

2.3. Características fundamentales de los RSU

En la legislación se establecen tres grupos diferenciados de residuos: los residuos urbanos o domésticos, cuyo tratamiento se basa en la recogida selectiva y la minimización de residuos, fomentando el reciclaje y la reutilización; los residuos industriales, los cuales se generan en el ámbito industrial e incluyen residuos de construcción y demolición, aceites industriales y otros derivados de los procesos productivos y los residuos peligrosos, cuyo tratamiento y disposición final requieren medidas especiales para evitar daños a la salud humana y al medio ambiente debido a su toxicidad, corrosividad, etc⁶. A continuación, se comentarán las principales características del primer tipo de deshecho, ya que es el más relevante en la elaboración de este trabajo.

En la [Figura 2](#) se ilustra la composición media de los residuos sólidos urbanos (RSU) por región mundial. Destacan especialmente África, Asia, Centroamérica, el Caribe y Sudamérica, donde más del 60 % de los desechos corresponden a materia orgánica, principalmente residuos de jardinería y restos de alimentos. Además, es importante señalar que la categoría “Otros” agrupa materiales diversos como textiles, madera, caucho, cuero y productos de higiene personal y del hogar.

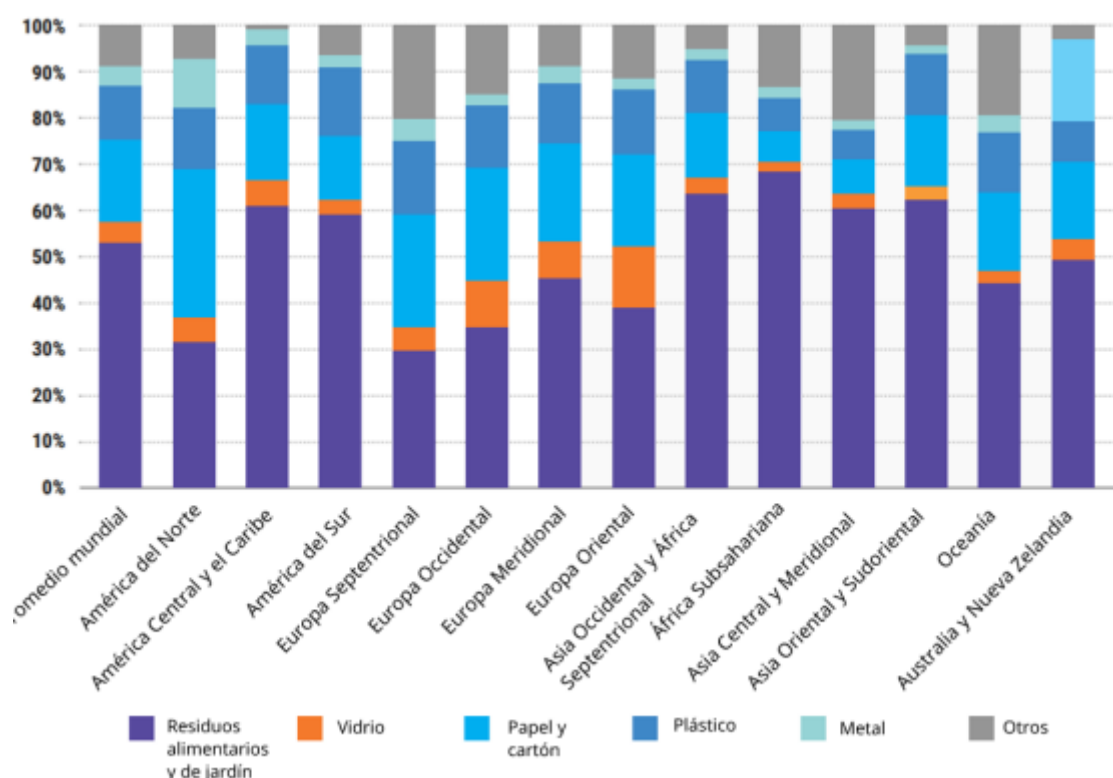


Figura 2. Promedio mundial y desglose regional de la composición de los RSU, 2024. Fuente: Organización Internacional del Trabajo (OIT).

⁶<https://mediambient.gva.es/documents/20549779/92789153/PIRCV/d1f9f607-ed36-4437-a3a7-ded32dd9f6a1>.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) comprenden los desechos generados fundamentalmente en entornos urbanos, procedentes tanto de los hogares como de pequeñas empresas, oficinas y servicios públicos, que comparten naturaleza y composición con los residuos domésticos. Incluyen materiales muy diversos, residuos orgánicos, papel, plásticos, vidrio, metales y textiles, que, a grandes rasgos, pueden agruparse en dos categorías⁷:

- **Residuos orgánicos:** materiales de origen natural susceptibles de descomposición biológica (restos de alimentos, podas, residuos verdes).
- **Residuos inorgánicos:** materiales de procedencia sintética o mineral (plásticos, metales, vidrios, textiles).

Más allá de esta clasificación básica, los RSU presentan características físicas, químicas y biológicas específicas que condicionan su recolección, transporte, tratamiento y valorización. En la práctica, se emplean distintas tecnologías de valorización (compostaje, digestión anaerobia, incineración con recuperación de energía y producción de combustibles derivados de residuos), seleccionadas en función de las propiedades particulares de cada fracción de residuo.

2.3.1. Características físicas:

Composición → Como ya se ha comentado, los RSU están compuestos de diferentes materiales. Según la ubicación geográfica de los residuos, esta característica varía significativamente generando un impacto directo en los métodos y estrategias utilizadas para el tratamiento y gestión de los residuos. Por ejemplo, en la figura anterior, se ha observado como en climas cálidos y húmedos predominan fracciones orgánicas frescas que favorecen procesos biológicos, mientras que en zonas áridas aumenta el porcentaje de fracciones inorgánicas ligeras, óptimas para valorización energética.

Peso específico → Se define como la relación entre la masa y el volumen del material de residuos, expresada en kg/m³. Este parámetro es fundamental para dimensionar la infraestructura de gestión (transporte, tolvas, compactación y capacidad de vertedero), ya que permite convertir el volumen de residuos generado en la masa correspondiente.

Técnicamente, el peso específico de los RSU varía típicamente entre 180 y 420 kg/m³, dependiendo de su composición y grado de compactación⁸. Valores más elevados se registran en fracciones con alto contenido de materia orgánica y humedad, mientras que residuos ligeros (plásticos, cartones poco prensados) se sitúan en el extremo inferior de ese rango.

La determinación precisa de este valor se realiza mediante ensayos de laboratorio normalizados (p. ej. UNE-EN 15002), en los que un volumen conocido de muestra se compacta bajo carga estándar y se registra la masa resultante para calcular el peso específico real en condiciones de explotación.

⁷ <https://www.ucm.es/iuca/file/articulo-3-m-a-2024-1?ver>

⁸ <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055568> UNE-EN 15002.

Humedad → Un contenido de humedad adecuado facilita la actividad microbiana necesaria para la descomposición de la materia orgánica. Un excesivo porcentaje de humedad puede generar condiciones anaeróbicas que retrasen el proceso de descomposición e incrementar el peso total de los residuos. Habitualmente, la humedad se expresa de dos maneras: por **peso húmedo**, donde el porcentaje se calcula respecto al peso del material en su estado natural, es el método más empleado en gestión de residuos sólidos; o por **peso seco**, en el que el porcentaje se refiere al peso del material tras eliminar toda el agua mediante secado.

Densidad → Es un factor básico que marca los volúmenes de los equipos de recogida y transporte, tolvas de recepción, cintas, capacidad de vertederos, etc. Esta propiedad varía significativamente según el tipo de residuo y su estado de compactación. Los residuos orgánicos suelen tener una densidad más alta comparada con los plásticos, es por ello, que la reducción de volumen tiene lugar en todas las fases de la gestión de los residuos para optimizar la operación, ya que el espacio que ocupan los desechos en estas operaciones es uno de los problemas fundamentales. Además, la densidad también influye en cómo se compactan los residuos en los vertederos o en otras instalaciones de disposición final.

El tamaño de las partículas → El tamaño de las partículas influye tanto en la velocidad del proceso de descomposición, como en la forma de gestionar los residuos en las instalaciones de procesamiento. En primer lugar, las partículas más pequeñas aumentan la superficie de contacto de los microorganismos con el material y aceleran la descomposición y en segundo lugar, si se reduce el tamaño de las partículas se reduce el volumen general de los residuos facilitando el almacenaje, transporte y disposición final⁹.

Porosidad → Es una propiedad que determina la capacidad del material para permitir el paso de aire y agua a través de su estructura. Una porosidad adecuada facilita la circulación de oxígeno, evitando la formación de zonas anaeróbicas que podrían ralentizar los procesos de descomposición y generar olores desagradables. Además, la porosidad influye en la retención de humedad y en la capacidad de los residuos para ser compactados, aspectos esenciales para el diseño y operación de sistemas de tratamiento como el compostaje. Sin embargo, un exceso de porosidad puede hacer que los residuos sean más volátiles y dificultar su manejo. Por ello, es fundamental controlar y ajustar la porosidad durante las distintas etapas de la gestión de los RSU para optimizar los procesos de tratamiento y minimizar los impactos ambientales¹⁰.

2.3.2. Características químicas:

Fracción de materia orgánica (FMO) → Se refiere a la porción biodegradable de los RSU, compuesta principalmente por restos alimentarios, vegetales y, en menor medida, animales. Esta fracción constituye, según datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente, entre el 30 % y el 60 % del total de los residuos municipales en países mediterráneos, dependiendo del nivel de desarrollo y de los hábitos de consumo. Su proporción determina el potencial de aprovechamiento mediante procesos biológicos como el

⁹ [Características físicas de los residuos sólidos urbanos - Ambientum.](#)

¹⁰ http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/654/1/Fernandez_Gatica_Daniela_Alejandra.pdf.

compostaje o la digestión anaerobia. Además, una FMO elevada facilita el cumplimiento de objetivos comunitarios en materia de reciclado y reducción de residuos en vertedero (Directiva 2018/851/UE). No obstante, su eficacia depende también del nivel de impropios presentes (plásticos, metales), que deben mantenerse por debajo del 5 % para garantizar la calidad del compost (según el PIRCVA)¹¹.

Relación carbono/nitrógeno → Es un parámetro crucial para el rendimiento de procesos biológicos. El carbono actúa como fuente de energía para los microorganismos, mientras que el nitrógeno es esencial para su crecimiento. Un valor óptimo oscila entre 20:1 y 30:1 en masa seca. Valores por encima de este rango indican un exceso de carbono, lo que ralentiza la descomposición, mientras que valores inferiores pueden producir amoníaco y malos olores. Este parámetro se ajusta mediante la mezcla adecuada de materiales ricos en carbono (hojas secas, cartón) y ricos en nitrógeno (restos de cocina, césped). Su correcta regulación influye directamente en la eficiencia del compostaje o la generación de biogás, reduciendo tiempos de proceso y emisiones incontroladas¹².

Presencia de metales pesados y sustancias tóxicas → Determinadas fracciones de RSU pueden contener contaminantes peligrosos como cadmio, mercurio, plomo, cromo o sustancias orgánicas persistentes. Su origen se encuentra, principalmente, en residuos electrónicos, baterías, pinturas o ciertos envases. La presencia de estos compuestos limita severamente la valorización orgánica y energética del residuo, además de suponer un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Por ello, directivas europeas como la 2008/98/CE y el Reglamento (UE) 2019/1021 establecen límites máximos para su presencia en los residuos gestionados, y exigen sistemas de separación y tratamiento específicos. A nivel nacional, la Orden AAA/661/2013 fija parámetros de concentración admisible para metales pesados en compost destinado a uso agrícola¹³.

Potencial calorífico → Es la cantidad de energía que puede liberarse por unidad de masa de residuo al ser sometido a procesos de combustión o valorización térmica. Se mide en MJ/kg y depende directamente del contenido en materiales combustibles (plásticos, papel, textiles) y del grado de humedad (que reduce el poder calorífico útil). En promedio, los RSU tienen un poder calorífico inferior (PCI) de entre 6 y 11 MJ/kg, aunque fracciones secas como los residuos de envases pueden alcanzar hasta 18 MJ/kg (IPCC, 2019; CEWEP, 2023). Este dato es crucial para evaluar la viabilidad técnica y económica de tecnologías como la incineración con recuperación energética o la producción de combustibles derivados de residuos (CDR). El PCI también condiciona el cumplimiento de eficiencia energética exigido por la Directiva 2010/75/UE para que la incineración se considere valorización y no eliminación.

¹¹ [Recogida de la fracción orgánica según PIRCV | Mancomunidad del Alto Turia.](#)

¹² [RelacioicalculCN.pdf.](#)

¹³ [MODELOS DE DESARROLLO, DEGRADACIÓN DEL MEDIOAMBIENTE Y RIESGOS AMBIENTALES: ESTUDIO DE CASOS.
https://www.ucm.es/iuca/file/articulo-3-m-a-2024-1?ver](#)

2.3.3. Características biológicas:

Biodegradabilidad → Es la capacidad de los componentes orgánicos de los RSU para descomponerse mediante la acción de microorganismos, transformándose en productos simples como dióxido de carbono, agua, metano, humus y nutrientes minerales. Esta propiedad depende de la naturaleza del material (por ejemplo, celulosa, almidones y proteínas son altamente biodegradables), y de factores externos como temperatura, humedad, oxigenación y pH. Según estudios técnicos¹⁴, más del 50 % de la fracción orgánica de los residuos municipales es biodegradable en condiciones óptimas. La tasa de biodegradación es crítica para procesos como el compostaje y la digestión anaerobia, ya que determina la duración y el rendimiento de la estabilización biológica del residuo.

Actividad Microbiana → Los RSU actúan como sustrato para una amplia variedad de comunidades microbianas (bacterias, hongos, actinomicetos), cuya composición varía en función de la fracción de residuos y las condiciones ambientales. Esta actividad puede desarrollarse en medios **aeróbicos**, generando calor, CO₂ y compost estable, o **anaeróbicos**, donde se produce biogás (mezcla de metano y dióxido de carbono) y digestato. La actividad microbiana es determinante en el diseño y operación de tecnologías de tratamiento biológico. Una baja actividad puede reflejar condiciones inhibitorias (metales pesados, pH extremos), mientras que una actividad elevada indica un proceso eficiente y bien regulado.

Generación de gases → Durante la descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los RSU, se produce gas metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), y trazas de otros compuestos (NH₃, H₂S). Este fenómeno se inicia al cabo de unas semanas tras el enterramiento del residuo y puede mantenerse durante décadas. En vertederos, la producción de biogás puede alcanzar entre 100 y 250 Nm³ por tonelada de residuo depositado, dependiendo del contenido en materia biodegradable y del grado de compactación y humedad¹⁵. Estos gases son aprovechables energéticamente, pero también suponen un riesgo si no se gestionan adecuadamente, debido a su alta contribución al cambio climático (el potencial de calentamiento global del metano es 25 veces superior al del CO₂ en un horizonte de 100 años) y al riesgo de explosión.

Las emisiones de biogás y la producción de lixiviados son dos de los aspectos más importantes a controlar en un vertedero de RSU.

2.3.4. Producción y composición RSU en la Comunidad Valenciana

Como se ha comentado anteriormente, la composición de los deshechos varía dependiendo de la ubicación geográfica. Por el otro lado, la producción de RSU depende del tamaño de la población, es por ello que en núcleos urbanos se genera menor cantidad de RSU que en un núcleo urbano residencial. Un claro ejemplo es que en una ciudad la producción por cápita podría ser del orden de 1,4 kg/hab/día y en un pequeño pueblo de 0,7 kg/hab/día, esto ocurre debido a que “a menor nivel de vida”,

¹⁴ [Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review - ScienceDirect.](#)

¹⁵ [Microsoft Word - V5_Ch3_SWDS_Final_v2.doc](#) IPCC, 2019.

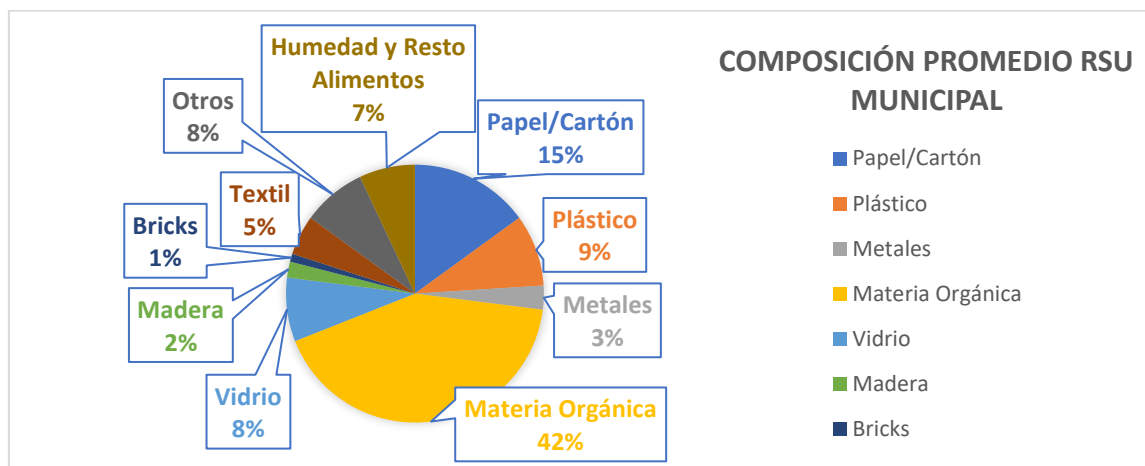
menor es el consumo y menor es la cantidad de residuos generada. Además de esto, en las pequeñas poblaciones se suele recuperar parte de los residuos.

Como se ha comentado anteriormente, según el Instituto Nacional de Estadística en España, en el año 2022, se generó 1,32 kg/RSU/habitante.

En definitiva, se tiene en cuenta que la producción y composición de los RSU depende de tres aspectos fundamentales:

- La situación geográfica de la población: clima, residuos de parques y jardines, producción agrícola, etc.
- El nivel de vida de la población influye en la cantidad y calidad de los residuos. A mayor nivel de vida mayor producción de RSU.
- Estructura económica de la ciudad: industrial o de servicios.

La composición promedio por materiales de los residuos de competencia municipal según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, con el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 es la que se representa en la [Gráfica 1](#).



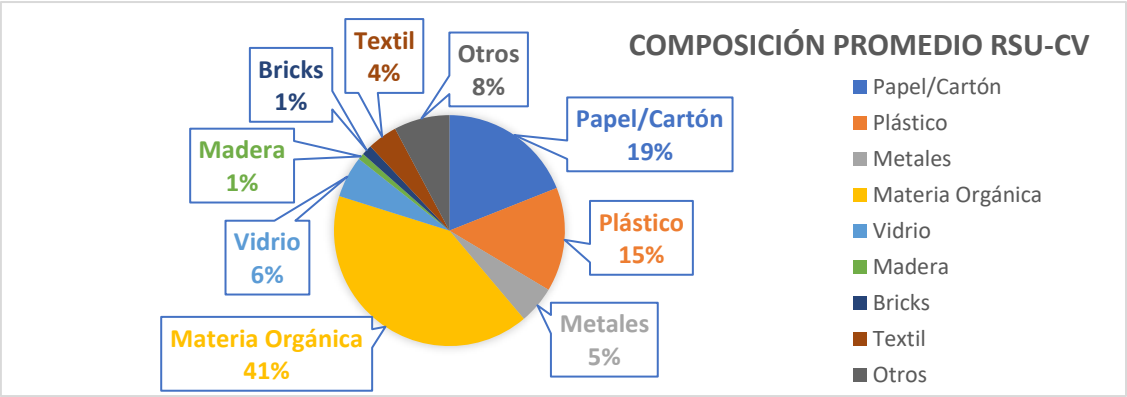
Gráfica 1. Composición RSU - Municipal. Fuente: MITECO, Ley 7/2022.¹⁶

La composición promedio a nivel estatal se divide en diez porciones papel/cartón (15%), plástico (9%), metales (3%), materia orgánica (42%), vidrio (8%), madera (2%), bricks (1%), textil (5%), otros (8%) y humedad y resto alimentos (7%).

Con todo ello se tiene un gráfico bastante actualizado (año 2022) del promedio de composiciones de un RSU, donde la fracción mayoritarias son los biorresiduos seguidos del papel. Una vez representada ésta, se ha realizado la [Gráfica 2](#), pero con los datos del Documento Síntesis del Plan Integral de Residuos de la

¹⁶ [230705 nuevo PEMAR IP Revisado.pdf](#)

Comunidad Valenciana (PIRCV): papel/cartón (19%), plástico (15%), metales (5%), materia orgánica (41%), vidrio (6%), madera (1%), bricks (1%), textil (4%), otros (8%) [9].



Gráfica 2. Composición RSU Comunidad Valenciana. Fuente: Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana.

Como se observa en la [Tabla 1](#), se ha realizado una comparativa sobre la composición de los RSU de cada Plan. Se puede ver en la columna de la derecha de la tabla siguiente que las diferencias entre el plan autonómico y el nacional no son significativas, y como los datos más actualizados que se han encontrado publicados por fuentes oficiales son los estatales.

Tabla 1. Comparación composición de RSU a nivel estatal con la Comunidad Valenciana. Fuente: Elaboración propia.

RESIDUOS	Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana Año 2010	Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos - Secretaría de Estado de Medio Ambiente 2016-2022	Diferencias
Papel/Cartón	19%	15%	4%
Plástico	15%	9%	6%
Metales	5%	3%	2%
Materia Orgánica	41%	42%	-1%
Vidrio	6%	8%	-2%
Madera	1%	2%	-1%
Bricks	1%	1%	0%
Textil	4%	5%	-1%
Otros	8%	8%	0%
Humedad y Resto Alimentos	-	7%	-

A partir de la tabla anterior, se puede concluir que existe una similitud entre la composición de residuos tanto en el territorio nacional como en la Comunidad Valenciana, y esta similitud se puede extrapolar dentro de la comunidad, es decir, la composición de los residuos sólidos urbanos generados en las distintas poblaciones de la comunidad valenciana será igual o muy similar.

La composición del RSU anterior hace referencia al residuo que se genera antes de que el residuo entre en las plantas de tratamiento mecánico-biológico con compostaje de la Comunidad Valenciana, por lo tanto, la composición del RSU que se destina a vertedero será la resultante tras este proceso.

2.3.5. Gestión de los RSU en la Comunidad Valenciana

El modelo de gestión de los residuos urbanos empleado en la Comunidad mantiene una filosofía similar a las establecidas en el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana del 97 (PIRCV 97). En este Plan se agrupan los municipios colindantes en distintas zonas donde se soluciona la gestión de sus residuos de manera integrada y completamente independiente de las zonas contiguas.

El territorio de la Comunidad Valenciana se dividió en 18 zonas: 5 correspondientes a la provincia de Castellón, 7 a la provincia de Valencia y 6 a la de Alicante. No obstante, la nomenclatura utilizada dificultaba la identificación del ámbito territorial al que se refería. Es por ello, que en la actualidad, la numeración romana se ha sustituido por números arábigos adaptándose a la agrupación existente de las zonas de gestión (de norte a sur) y a la nomenclatura se le añade la primera letra del nombre de la provincia a la que pertenecen.

Tabla 2. Nomenclatura utilizada para la división zonal de la Comunidad Valenciana. Fuente: Elaboración propia.

NOMENCLATURA ANTERIOR DE LOS PLANES ZONALES	NOMENCLATURA ANTERIOR DE ÁREAS DE GESTIÓN	NUEVA NOMENCLATURA DE PLANES ZONALES	NUEVA NOMENCLATURA DE ÁREAS DE GESTIÓN
Plan zonal de la zona I	-	Plan zonal 1	G1
Plan zonal de las zonas II, IV, V	-	Plan zonal 2	G2
Plan zonal de las zonas III, VIII	AG 2	Plan zonal 3	C3/V1
Plan zonal de las zonas III, VIII	AG 1	Plan zonal 3	V2
Plan zonal de las zonas VI, VII, IX	-	Plan zonal 4	V3
Plan zonal de las zonas X, XI, XII	AG 1	Plan zonal 5	V4
Plan zonal de las zonas X, XI, XII	AG 2	Plan zonal 5	V5
Plan zonal de la zona XV	—	Plan zonal 6	A1
Plan Zonal de la Zona XIV	—	Plan zonal 7	A2
Plan Zonal de la Zona XIII	—	Plan zonal 8	A3
Plan Zonal de la Zona XVI	—	Plan zonal 9	A4
Plan Zonal de la Zona XVIII	—	Plan zonal 10	A5
Plan Zonal de la Zona XVII	—	Plan zonal 11	A6

Como se observa en la [Tabla 2](#) el número de Planes Zonales se ha reducido adaptándose a las nuevas necesidades para prestar los servicios de valorización y eliminación de residuos de forma más eficaz. Fruto

de esta reorganización paulatina, algunos municipios se han adscrito a otras áreas de gestión, siendo Montán (Castellón) y San Antonio de Benagéber (Valencia) las últimas actualizaciones.

Cabe destacar, que el presente PIRCVA (2020-30), prevalece sobre los Planes Zonales, ya que es el documento de planificación, en materia de ordenación territorial y gestión de residuos, de rango superior en la Comunidad Valenciana. En este Plan se establecen: la organización de la recogida selectiva de residuos en cada municipio, el fomento de la educación ambiental, la transparencia de datos, la coordinación de la disposición final, las obligaciones de los planes zonales y los objetivos generales, como:

- Limitar al 42%, como máximo, la generación total de rechazos no valorizables, con destino a vertedero, sobre la totalidad de residuos producidos.
- Conseguir reducir anualmente el % de rechazo a vertedero sobre la totalidad de residuos producidos. Admitiendo un máximo de 35 % para el 31 diciembre 2020, un 34 % para el 31 diciembre 2021 y un 30% para el 31 diciembre 2022.

Para comprender el sistema establecido en la Comunidad Valenciana para la recuperación y posterior reciclaje de los residuos, es necesario señalar que, a nivel nacional, se emplea un sistema separativo, mediante el cual cada tipo de residuo recibe un tratamiento específico (Figura 3).

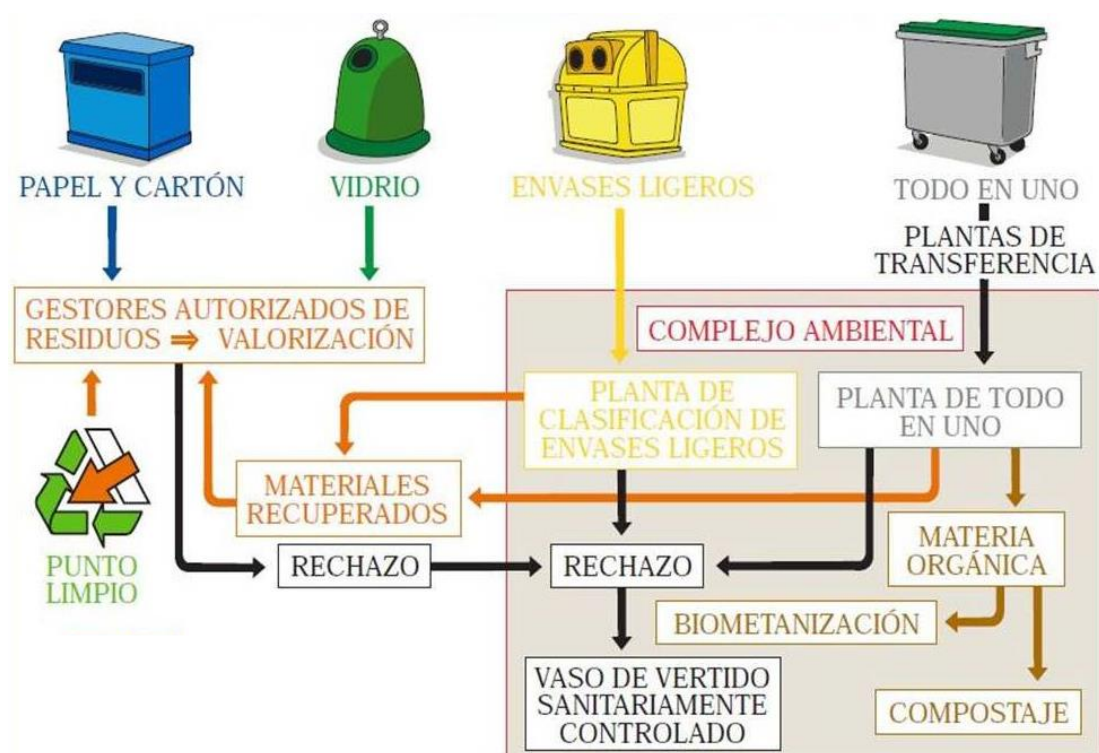


Figura 3. Sistema de funcionamiento para el tratamiento de los RSU. Fuente: ECOEMBES
<https://images.app.goo.gl/ECRr3quRumKHBQZ99>.

La gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en la Comunidad Valenciana se estructura en dos fases diferenciadas, como resultado de la colaboración entre diversos actores, con el fin de asegurar que los residuos sean gestionados de forma eficiente, sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Por un lado, la recogida y el transporte es competencia municipal y se lleva a cabo a través de concursos municipales donde compiten varias empresas privadas y, por otro lado, la parte de tratamiento, valorización y eliminación lo gestionan los consorcios. El Consorcio está integrado por la Generalitat Valenciana, la Diputación de València y los municipios correspondientes. Este ente se crea para desarrollar un plan zonal concreto, donde se contempla una zona geográfica con un proyecto particular a desarrollar en esa zona, con el fin de conseguir una gestión sostenible de los RSU fundamentado en la reducción y priorización de la recogida selectiva.

Asimismo, los consorcios tienen la responsabilidad de organizar y coordinar la recogida, el transporte y la eliminación de residuos desde las plantas de tratamiento y centros de transferencia, en sus respectivas zonas. Es por ello, que gran parte de los consorcios existentes en la Comunidad Valenciana se han unido para formar una red consorciada de ecoparques, los cuales son puntos limpios donde se recogen residuos que no deberían de acabar en las plantas de residuos urbanos: chatarra, nevera, televisión, etc.

El proceso para gestionar los residuos en la Comunidad Valenciana es el siguiente:

1. Los Ayuntamientos, ya sea mediante empresas privadas o con sus propios medios recogen los residuos y los depositan en la estación de transferencia más cercana.
2. La estación de transferencia mejora la eficiencia del sistema de recogida y transporte, ya que es un punto intermedio donde se agrupan los residuos procedentes de diversas zonas, facilitando su traslado y distribución a las instalaciones de tratamiento o reciclaje.
3. En las plantas de tratamiento, se lleva a cabo la valorización y eliminación de los distintos residuos sólidos urbanos (RSU). En cuanto a este último proceso, lo habitual es que el rechazo generado en las plantas sea transportado al vertedero, siendo preferible que este se ubique de manera anexa a la planta de tratamiento. Esta disposición tiene como objetivo reducir el volumen de emisiones asociadas al transporte de los residuos, optimizando así la eficiencia del sistema y minimizando el impacto ambiental del traslado de la basura.

También cabe destacar que el tratamiento y la eliminación de los residuos en la Comunidad Valenciana se realiza mediante una combinación de instalaciones públicas y privadas. Estas instalaciones incluyen plantas de reciclaje, incineración, compostaje y vertederos. A modo de ejemplo:

- **Ecovidrio** es una entidad que gestiona el reciclaje de vidrio en la Comunidad Valenciana mediante una red de contenedores verdes, y su tarea es asegurar que el vidrio recogido se destine a plantas de reciclaje.

- **Ecoembes** es una entidad privada sin ánimo de lucro que gestiona el reciclaje de los envases de plástico, latas y bricks en la Comunidad Valenciana y en toda España. Se encarga de la financiación y organización de las plantas de reciclaje de envases plásticos.
- **VAERSA** (Valenciana de Gestión de Residuos, S.A.) es una empresa pública de la Generalitat Valenciana encargada de la gestión integral de los residuos en la Comunidad Valenciana en algunos consorcios.

Finalmente, todos los residuos se derivan a las 11 plantas TMB de la Comunidad Valenciana:

CASTELLÓN	VALENCIA	ALICANTE
CERVERA DEL MAESTRE – C1 ONDA – C2 ALGIMIA DE ALFARA – C3-V1	MANISES – V2 QUART DE POBLET – EMTRE LLÍRIA – V3 CAUDETE DE LAS FUENTES – V3 GUADASSUAR – V4	CAMPELLO – A1 XIXONA – A2 VILLENA – A3 ELCHE – A5

2.4. Tecnologías para el tratamiento de RSU

En este apartado se describen brevemente los fundamentos teóricos de las tecnologías simples y compuestas más utilizadas en el ámbito de la gestión de residuos sólidos urbanos. Asimismo, se introducen las distintas hipótesis/simplificaciones establecidas en las tecnologías compuestas, las cuales reciben este nombre, ya que se constituyen mediante la adición de dos o más metodologías simples.

2.4.1. Tecnologías simples

Tratamiento mecánico.

El tratamiento mecánico de residuos consta esencialmente de la trituración de residuos con un elevado contenido metálico, como son los RAEEs (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos) y equipos de intercambio térmico, los cuales están inscritos dentro de los RSU. Las plantas donde se llevan a cabo dichos tratamientos se componen de varios procesos: entrega, recepción y aceptación, preselección y pretratamiento, trituración, procesos post-trituración y técnicas descontaminantes a final de línea.

La parte operativa central de la planta es la de trituración. Aquí los residuos entran en una trituradora que consta de una caja con un rotor con martillos que machaca y tritura el material. Éste reduce su tamaño progresivamente hasta que pasa por una rejilla, donde es separado en distintas corrientes:

Metales férricos.		Metales no férricos		Resto
-------------------	--	---------------------	--	-------

Dentro del tratamiento mecánico, cabe destacar varios aspectos:

1. Existen tratamientos de trituración en condiciones húmedas, los cuales serán necesarios emplear para los residuos urbanos mezclados (RUM) y para la fracción orgánica recogida selectivamente (FORS) debido al gran porcentaje de humedad. En estos tratamientos, la separación del material se realiza de una manera distinta, se reduce la proporción de materiales de baja densidad y se produce una cantidad considerable de lodo.
2. Las trituradoras de equipos que contienen fluorocarbonos volátiles (VFCs) o hidrocarbonos volátiles (HVCs), requieren de un tratamiento específico conforme a la regulación del Reglamento (UE) 2024/590. Estas sustancias que agotan la capa de ozono se encuentran principalmente en los equipos de intercambio de temperatura (frigoríficos, congeladores, refrigeradores de agua, aparatos de aire acondicionado...) y su extracción se realiza mediante desgasificación y posterior calentamiento a 110°C de la cámara de trituración.
3. El tratamiento mecánico de residuos con valor calorífico tiene por objeto la obtención de un producto no peligroso para la obtención de combustible. Su importancia radica en que esta técnica se suele combinar con el de tratamiento biológico, dando lugar a las instalaciones de tratamiento mecánico-biológico TMB que se analizarán posteriormente.

El resultado de esta técnica son los combustibles sólidos, los cuales difieren respecto al resto de combustibles en los contenidos de azufre, cloro y metales pesados.

Tratamiento biológico.

El tratamiento biológico de residuos se caracteriza por el uso de microorganismos que descomponen la materia orgánica de los residuos en: agua, CO₂, sustancias inorgánicas y algunas sustancias orgánicas más simples que las de inicio. En función de la presencia o no de oxígeno, los residuos se descomponen mediante distintos procesos:

- Tratamiento aerobio
- Tratamiento anaerobio
 - o Acidogénesis
 - o Metanogénesis

Las condiciones óptimas para un tratamiento biológico de residuos son la ausencia de toxicidad en la materia prima, un rango entre 4 y 8 de pH y una proporción adecuada entre los siguientes compuestos: carbono, nitrógeno y fósforo respectivamente.

Tratamiento aerobio de residuos.	Tratamiento anaerobio de residuos.
Mediante este tratamiento se consigue la producción de compost, para fertilizante y de combustible en menor medida. Los mayores rendimientos se consiguen con una materia prima fácilmente biodegradable, húmeda (50-65%), con un ratio Carbono:Nitrógeno óptimo de 20:1 y que exista la circulación de oxígeno. El proceso consta de cuatro etapas, a saber: recepción, preparación, compostaje y finalización. En primer lugar, se pesan, revisan y analizan los residuos entrantes, en la preparación se realiza la apertura de las bolsas de basura, retirada de objetos no deseados, homogenización... Seguidamente, se produce la descomposición intensiva y maduración y, por último, se clasifica el material por tamaños y/o se quitan impurezas. En función del diseño de la descomposición, la disposición y mezcla de las hileras y el sistema de ventilación existen varios tratamientos: <u>Sistema Brikollare</u> <u>Hileras planas y triangulares</u> <u>Compostaje en tambor, en túnel y lineal</u> <u>Bajo membrana semipermeable en hileras</u> <u>Biosecado</u>	La digestión anaerobia consta de cuatro fases: la hidrólisis, donde los compuestos poliméricos son transformados en compuestos orgánicos más simples; en la acidogénesis, las bacterias acidogénicas descomponen la materia en ácidos menos grasos; en la acetogénesis, las bacterias acetogénicas se transforman en ácido acético y en la metaenogénesis, as arqueas lo reducen todo a metano y CO₂. El producto del tratamiento sin presencia de oxígeno es el biogás y una fracción sólida llamada digestato. Por un lado, el biogás es una fuente de energía renovable de electricidad, calor y/o combustible, a partir de la cual se puede producir también biometano. Por otro lado, el digestato, si es de calidad y cumple las condiciones impuestas por la normativa, puede ser usado como fertilizante orgánico en forma líquida (como el estiércol), semisólida (turba) o ser mejorado mediante compostaje, secado, horticultura y jardines. En caso de no ser de suficiente calidad, por contener demasiadas impurezas, otra opción para su salida comercial es su aprovechamiento energético.

Tratamiento mecánico-biológico (TMB).

El tratamiento TMB, combina los tratamientos mecánico y biológico descritos en los puntos anteriores. Mediante esta combinación se reduce el volumen y contenido orgánico de los residuos, permitiendo, si es posible, su uso como combustible derivado de residuos (CDR).

Los residuos entrantes en dicho tratamiento son más diversos y heterogéneos, así que la maquinaria a usar debe ser más robusta, asimismo, a los productos de salida contienen tantas impurezas que la legislación vigente no permite su uso como compost, este material resultante recibe el nombre de bioestabilizado y puede utilizarse como material de cierre en vertederos o en casos justificados en el sector de la agricultura.

A continuación, se muestra el proceso de una planta de tratamiento mecánico-biológico, concretamente el centro de tratamiento de residuos de Algimia de Alfara (Castellón). Este centro se ubica en el interior del Parque Natural de la Sierra Calderona, a 40 km de Valencia y cuenta con una capacidad de tratamiento de 120.000 t/año. Desde el 2010 trata los residuos urbanos (RU) del Consorcio Plan Zonal III y VIII, Área 2 de la Comunidad Valenciana que recoge a 56 municipios, dando servicio a 210.000 habitantes aproximadamente¹⁷.

El proceso es el siguiente:

1. Recepción y descarga de residuos en una nave cerrada con un sistema tipo foso donde se ubica un brazo electrohidráulico con pulpo, manejado por un operario.
2. Línea de pre-tratamiento mecánico, cuyas operaciones de: alimentación, extracción de voluminosos, clasificación por fracciones “seca” y “húmeda” y recuperación de subproductos reciclable, están automatizadas. Para estas operaciones se emplea un sistema de tornillos sinfines que alimenta con un caudal constante el trómel principal donde se produce la clasificación “Seca/Húmeda”. Seguidamente, la fracción gruesa (>90mm) de residuos se introduce en una cámara de aspiración donde los elementos impropios no aspirados son transportados por una cinta al sistema de expedición del rechazo, exceptuando los materiales férricos, que son extraídos mediante un separador magnético en ubicaciones estratégicas.
3. Para la selección de subproductos de la fracción seca se reduce el tamaño del conjunto de elementos enviando la fracción de residuos, desprovista de elemento impropios, al triturador diferencial. La fracción resultante se envía a un trómel encargado de limpiar los materiales finos (<50mm). Fracción fina que posteriormente se enviará al módulo de compostaje.
 - Separación automática diferenciada de cada tipo de material → Una vez homogeneizada y limpia la fracción de envases se introduce por un sistema de separación aerodinámico, que separa el film plástico y lo envía a un granulador de cuchillos para la elaboración de combustible alternativo. El resto de la fracción va a un

¹⁷ <https://www.consorcipalanciabelcaire.com/la-planta-de-algimia/> y documentos oficiales facilitados por TETma.

separador de Foucault para la extracción de aluminio y finalmente a una batería de separadores ópticos para ordenar en silos los distintos subproductos.

4. La línea de tratamiento biológico tiene una duración de 6 semanas donde se produce la bioestabilización aeróbica de la fracción orgánica separada por medio del trómel primario, junto con el material fino del trómel secundario. En este proceso se distinguen 4 fases automatizadas:
 - Fase 1 - Compostaje acelerado: sistema dinámico de volteo diario y aireación forzada, en el que, tanto la carga de la fracción orgánica, efectuada por medio de una cinta especial, la aspiración, como la irrigación están controlados. Tras dos semanas, una fresa extractora transporta el compost bruto del reactor a la línea de afino.
 - Fase 2 - Afino intermedio: por medio de un trómel (T2000) con malla de 40mm, donde el rebose es enviado a un separador aerodinámico, la fracción gruesa de los subproductos es enviada a rechazo y la fracción fina se recupera.
 - Fase 3 -Maduración Biomax: análogamente a la fermentación, la maduración se realiza utilizando el mismo sistema dinámico en un reactor distinto. Este proceso permite obtener compost maduro en poco tiempo (6 semanas) y reutilizar las aguas del proceso.
 - Fase 4 -Afino final: separación de pequeños vidrios e inertes del compost mediante una última pasada por el trómel (TR2000).
5. Para el tratamiento de polvos y olores, todas las fases se efectúan en el interior de las naves cerradas con un sistema de ventilación forzada. Asimismo, el aire extraído en cada fase se envía a un biofiltro, de 1,5 m de espesor, constituido por una mezcla de cortezas coníferas
6. Finalmente, el rechazo obtenido en el proceso se lleva al vertedero de la Planta de Algimia, el cual se encuentra junto a esta y tiene una capacidad de 1.425.824 m³. Dispone de un sistema de gasificación conformado por los siguientes elementos:
 - Antorcha biogás: todas las chimeneas de gasificación están conectadas con la antorcha durante la explotación del vertedero, para evitar malos olores y reducir las emisiones.
 - Balas retráctiladas: los residuos se almacenan en balas compactadas y cubiertas con un material plástico que reduce notablemente la generación de lixiviados, de malos olores y otorga un mayor aspecto de organización y orden.
 - Cubrición balsa de lixiviados: se cubre con una lámina flotante con el fin de reducir cualquier posibilidad de malos olores.
 - Reducción olores/limpieza: además de los elementos ya comentados, las continuas medidas de limpieza general garantizan una ausencia casi total de olores en el vertedero.

La irregularidad en la composición de los RSU es uno de los mayores problemas para esta plantas, no obstante, gracias a sus proceso de separación y tratamiento avanzados, consigue un resultado constante en sus datos de explotación. Una vez terminado el proceso de tratamiento, la recuperación de subproductos es del 7%, la generación de Combustible Sólido Recuperado es del 12%, la producción de material bioestabilizado de un 21% y menos de un 29% de los residuos son enviados a vertedero.

Compostaje.

El compostaje es un proceso del que se tiene una amplia experiencia, éste consiste en la fermentación aerobia de la materia orgánica, dando como resultado un producto final estable, libre de patógenos y semillas, y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa. Es por ello, que la técnica del compostaje se describe como biológica y oxidativa, puesto que diversos microorganismos aerobios actúan sobre la materia orgánica, generando la reducción del volumen y peso de los residuos y su humificación y oscurecimiento ([Figura 4](#))¹⁸.

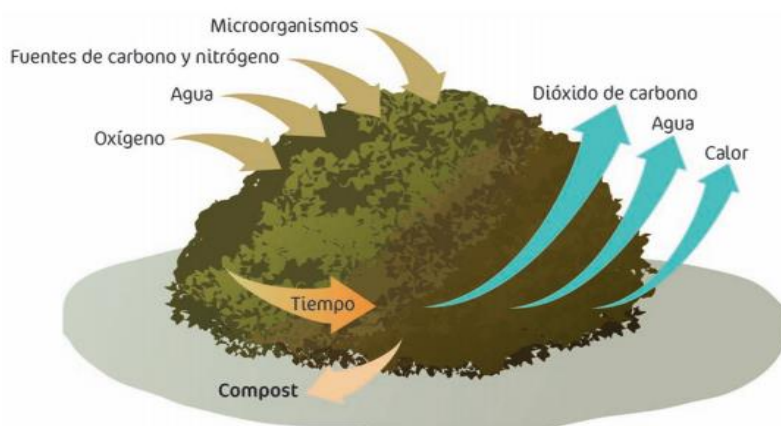


Figura 4. Esquema del proceso de compostaje. Fuente: [Guía PXG](#)

A pesar de que el proceso de compostaje tiene un fundamento muy sencillo, es muy robusto y también muy versátil, puede aplicarse a muchos tipos de materiales y mezclas, a escalas de trabajo muy distintas y empleando equipos muy o nada sofisticados, es preciso entenderlo para poder controlarlo y aprovechar al máximo sus posibilidades. Para que esta descomposición pueda llevarse a cabo, necesita de la existencia de materia orgánica biodegradable, una población microbiana inicial y unas condiciones específicas en la que se han de tener en cuenta los siguientes factores: la temperatura, la humedad, el pH, la aireación, el tamaño de partícula y la relación carbono-nitrógeno. A continuación, en la [Figura 5](#), se muestra de forma simplificada la reacción que se produce en este proceso y los factores más influyentes que determinan la eficacia del proceso:

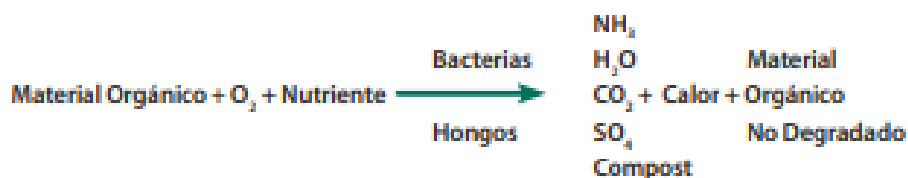


Figura 5. Proceso de compostaje. Fuente: [Guía Técnica sobre la Gestión de Residuos Municipales](#)

¹⁸ <https://www.upv.es/contenidos/ACALCISO/info/898019normalc.html>

Tabla 3. Resumen de las características del Compostaje. Fuente: Elaboración propia.

TECNOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS	CARACTERÍSTICAS EXTRÍNSECAS
COMPOSTAJE	Contenido de humedad (40-60%)	Condiciones climáticas (temperatura, humedad, etc.)
	Relación carbono/nitrógeno (C/N) (ideal 25-35)	Disponibilidad de espacio para la planta
	Composición orgánica (residuos vegetales, restos de alimentos, etc.)	Normativas ambientales y regulaciones locales
	Fracción de materia orgánica (alta biodegradabilidad)	Conciencia y participación de la comunidad en la separación de residuos
	Tamaño de las partículas y la porosidad	Acceso a tecnologías para controlar la temperatura y la humedad

Este proceso es una tecnología vigente por la eficiencia que ha mostrado en el tratamiento de residuos orgánicos sólidos. Además, puede considerarse una biotecnología, ya que supone una explotación industrial del potencial de los microorganismos, los cuales consiguen reducir el volumen y la masa de los residuos, que a su vez facilita su almacenaje y permite un aprovechamiento agrícola mejor y más flexible, y minimizar el riesgo sanitario inherente a todas las operaciones anteriores.

Para alcanzar el objetivo de estabilizar y homogeneizar la materia orgánica, el proceso de fermentación puede llevarse a cabo mediante sistemas de compostaje diferentes, donde las diferencias más notables residen en la forma de incorporación del aire, el control de la temperatura, la mezcla o el volteo del material y la duración del proceso.

Tabla 4. Tipología de sistemas de Compostaje. Fuente: Elaboración propia.

SISTEMAS DE COMPOSTAJE	
<u>ABIERTOS</u>	<u>CERRADOS</u>
Pilas o hileras volteadas. Pilas estáticas con aireación forzada. Sistemas combinados.	Reactores verticales. Reactores horizontales.

Sistemas abiertos:

Conocidos como los sistemas más tradicionales de compostaje, el sistema abierto suele aplicarse en zonas donde no existen problemas de falta de terreno, como en las zonas rurales. Se caracterizan por la sencillez tecnológica y su bajo coste. En estos sistemas de compostaje la masa de residuos se dispone en forma de hilera o de pila, manteniendo unas características geométricas determinadas, para que, en todos los puntos de la materia orgánica, se produzca el proceso aeróbico.

PILAS O HILERAS VOLTEADAS

Es el sistema más generalizado debido a su coste económico y fiabilidad. Precisa de espacio donde agrupar los residuos en múltiples pilas de 2 - 2,5 m de altura. Las principales desventajas de estos sistemas son la dificultad de mantener un nivel de oxígeno constante y el carácter discontinuo del sistema, el cual se traduce en una mayor duración en la operación.

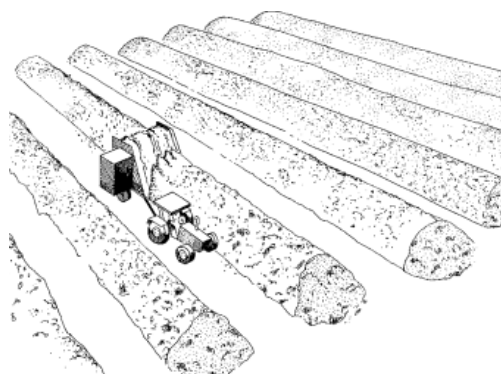


Figura 6. Compostaje en hileras con volteadora.

Fuente: Rynk et al., 1992

PILAS ESTÁTICAS CON AIREACIÓN FORZADA

Es un método desarrollado en los años 60' en EEUU, que coloca el material a compostar en hileras sobre un conjunto de tubos perforados o una solera porosa para facilitar el continuo flujo de aire a través de la materia orgánica. Para reducir los problemas de olor, el aire se filtra a través de una pila de compost maduro.

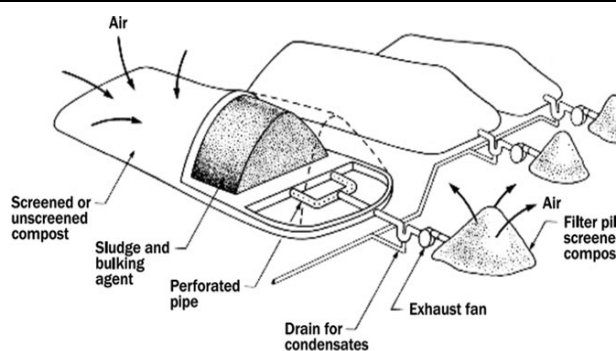


Figura 7. Pila estática aireada. Fuente: Rynk et al., 1992

SISTEMA COMBINADO

La combinación de la aireación forzada y el volteo mejora las condiciones y acelera el proceso de compostaje en comparación con los sistemas que solamente se voltean o airean con ventiladores.

Sistemas cerrados:

En estos sistemas los residuos se procesan en instalaciones estáticas o dinámicas, conocidos como reactores. Los reactores son estructuras generalmente metálicas y de forma cilíndrica o rectangular, donde se mantienen controlados determinados parámetros, como la humedad, aireación o temperatura. Estos sistemas van desde recipientes simples hasta sistemas muy complejos donde combinan agitación mecánica y aireación forzada de los residuos a compostar. Este tipo de sistemas permite acelerar las etapas iniciales del proceso, es decir, aquellas que se incluyen dentro de la fase de fermentación.

Una de las principales ventajas de estos sistemas es la reducción de las superficies necesarias para el compostaje y la mejora del control en los parámetros de fermentación y en los olores. Asimismo, presentan la ventaja de ser más rápidos en comparación con los sistemas abiertos pese a incurrir en mayores gastos económicos,

La selección del sistema dependerá de las necesidades y los recursos disponibles entre otros factores.

REACTORES VERTICALES

Suelen tener alturas superiores a los 4 m y pueden ser continuos o discontinuos. Por un lado, los reactores discontinuos contienen pilas de 2-3 m a diferentes alturas, con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores que encarece la construcción en relación con las pilas estáticas (reactores continuos) donde el material a compostar se encuentra en forma de masa única.

REACTOR VERTICAL CONTINUO

El inconveniente es el coste de instalación y de mantenimiento.

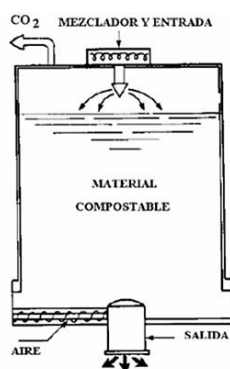


Figura 8. Reactor vertical continuo.
Fuente: [Microsoft Word - 2000 Compost CIEMAT.doc](#)

REACTOR CIRCULAR

El tiempo de residencia en el reactor es de 10 días.

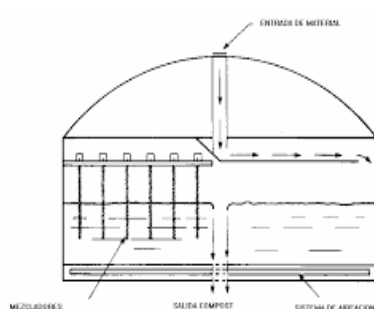


Figura 9. Reactor vertical continuo.
Fuente: [Microsoft Word - 2000 Compost CIEMAT.doc](#)

COMPOSTAJE EN CAJONES

Es el más simple y se utiliza de forma doméstica.



Figura 10. Compostaje en cajones.
Fuente: [COMPOSTAR DE FORMA SIMPLE EN CASA O EXTERIOR | Productos Sostenibles - BIO-Degradables](#)

REACTORES HORIZONALES

Se dividen entre aquellos que poseen un depósito rotatorio, los que poseen un depósito de geometría variable con un dispositivo de agitación o los que no poseen un sistema de agitación y permanecen estáticos.

CANALES RECTANGULARES DE AGITACIÓN

Combina la aireación controlada y los volteos periódicos mediante el uso de rieles en el canal.

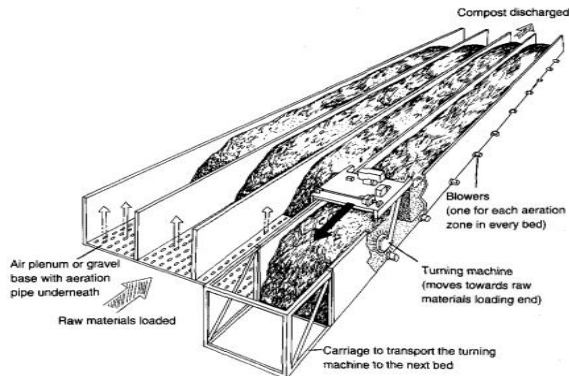


Figura 11. Canales rectangulares de agitación. Fuente: <https://ecommons.cornell.edu/items>

TAMBORES ROTATIVOS

Tiempo de residencia aproximado de 3 días, donde se mezcla, airea y mueve el material en el sistema.

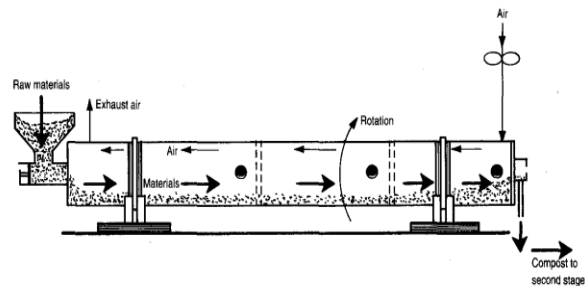


Figura 12. Tambores rotativos. Fuente: <https://ecommons.cornell.edu/items>

CONTENEDOR DE LECHO DE SÓLIDOS ESTÁTICO

Túnel de flujo pistón, cuya ventilación es controlada por impulsión o aspiración.



Figura 13. Contenedor de lecho de sólidos estáticos. Fuente: <https://ecommons.cornell.edu/items>

TÚNELES ESTÁTICOS

Cuentan con un sistema de riego y de aireación forzada y el tiempo de residencia es de 8-15 días.



Figura 14. Túneles estáticos. Fuente: <https://ecommons.cornell.edu/items>

El proceso del compost es muy similar al proceso del material bioestabilizado, ya que ambos son fruto de la descomposición de la materia orgánica. Según la legislación, la mayoría de la producción obtenida en las plantas de valorización de RSU de España pasa a ser considerado material bioestabilizado en lugar de compost debido a la calidad final del resultado. La diversidad de factores que influyen en la calidad del compost dificulta el establecimiento de sistemas que valoren la calidad del producto final. Algunos de estos factores son:

- El tipo de material que se somete a compostaje.

- La procedencia y recogida del material.
- El desarrollo del proceso de compostaje.
- La selección adicional en planta.
- El tratamiento del residuo (tipo de tecnología, equipamiento, funcionamiento...).

El compost se considera la enmienda orgánica obtenida a partir del tratamiento biológico aerobio y termófilo de residuos biodegradables recogidos separadamente. Es por ello, que el material orgánico obtenido de las plantas de tratamiento mecánico biológico de residuos mezclados, se denominará material bioestabilizado y no compost. Por último, cabe destacar los múltiples usos que se le pueden dar al compost y como varían las exigencias en función del fin que se le dé.

Biometanización.

La biometanización es un proceso de digestión anaerobia ([Figura 15](#)), cuyo objetivo es transformar la fracción orgánica biodegradable recuperada en las plantas de tratamiento mecánico biológico en biogás y en digesto. La materia orgánica resultante se destina a procesos biológicos de los que se obtendrá material bioestabilizado.

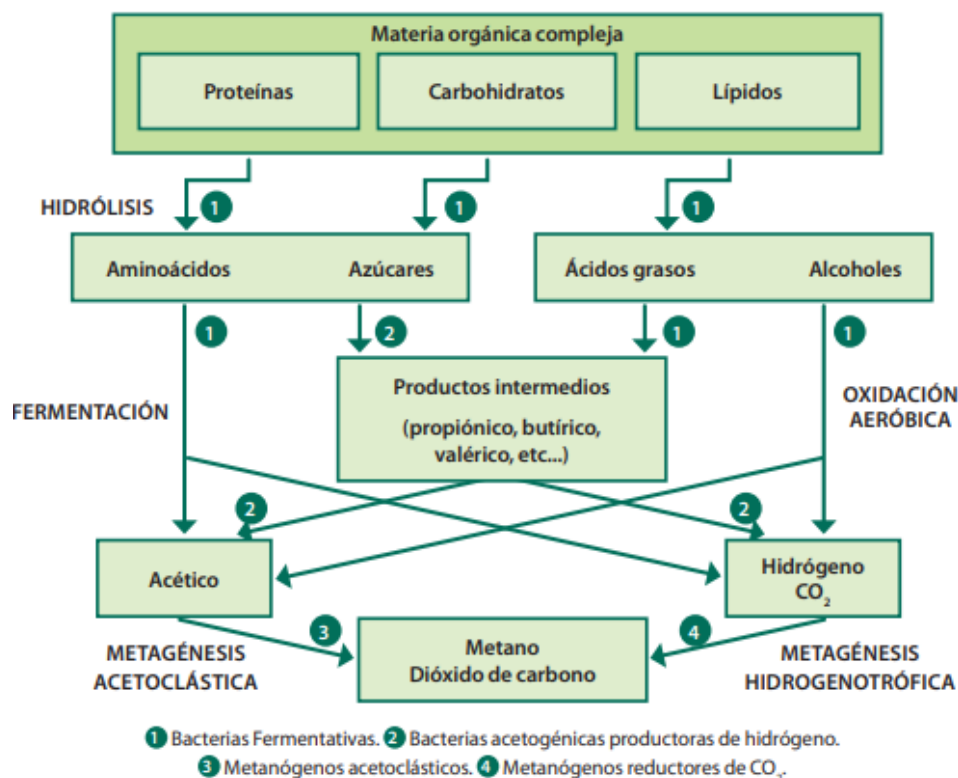


Figura 15. Esquema de reacciones en la digestión anaerobia. Fuente: [Guía Técnica sobre la Gestión de Residuos Municipales](#)

El proceso de biometanización posee múltiples ventajas que la convierten en una tecnología competitiva, sin embargo, se considera un proceso difícilmente controlable debido a los múltiples factores de control en la digestión anaerobia. Por un lado, algunos de estos beneficios son: el tratamiento de fracciones orgánicas de residuos urbanos de diferentes precedencias (Tchobanoglous et al, 1993), la eliminación de gran cantidad de materia volátil (De Baere, 2000), la desactivación de organismos patógenos, la baja producción y estabilización de lodos (Carreras y Dorronsoro, 1999) y la gran estabilización del vertido.

Por otro lado, los factores de control que influyen en la digestión aerobia son: la temperatura, donde a mayor temperatura se incrementa la producción de metano, pero es necesario un mayor control (mesófilo: 12 - 37°C o termófilo 37 - 65°C); el pH, ya que la acidez del medio influye sobre la producción de biogás al actuar en la actividad de los microorganismos; contenido de nutrientes, para conseguir la velocidad de reacción adecuada; la presencia de sustancias tóxicas, donde la principal

sustancia tóxica es el oxígeno; el tiempo de retención hidráulico, que es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de alimentación y el nivel de carga orgánica. A continuación, se muestra la [Tabla 5](#) con las características más relevantes para conseguir un funcionamiento eficiente del proceso:

Tabla 5. Resumen de las características de la Biometanización. Fuente: Elaboración propia.

TECNOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS	CARACTERÍSTICAS EXTRÍNSECAS
BIOMETANIZACIÓN (Digestión Anaeróbica)	Composición de residuos orgánicos (alta fracción biodegradable)	Infraestructura para el tratamiento de biogás y la gestión de lodos
	Contenido de humedad (60-85%)	Condiciones de temperatura
	Relación carbono/nitrógeno (C/N) (se puede modificar mediante la mezcla de residuos)	Disponibilidad de tecnología para capturar y utilizar biogás
	Contenido de sustancias inhibidoras (por ejemplo, metales pesados)	Costos y acceso a mercados para la venta de biogás

Una vez vistas las características más relevantes en el proceso de biometanización se exponen las distintas tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de RSU en función del tipo de régimen de flujo de la alimentación:

Tabla 6. Tipología de sistemas de biometanización. Fuente: Elaboración propia

SISTEMAS DE BIOMETANIZACIÓN			
<u>CONTINUOS</u>		<u>DISCONTINUO</u>	
Una etapa	Dos etapas	Una etapa	Secuencial

Sistemas continuos:

En los reactores continuos el material a tratar se encuentra en forma de masa única. Dentro de los sistemas continuos existe una subdivisión en función de si el proceso se lleva a cabo en una o en dos etapas. Además, en los sistemas continuos de una etapa se diferencian dos formas de digestión anaerobia: la fermentación húmeda y la seca, las cuales requieren de una elevada cantidad de agua. A continuación, se explicarán estas subcategorías con más detalle.

SISTEMA DE UNA ETAPA

A principios del siglo XX, el 90% de las plantas de digestión anaerobia en Europa eran de una etapa y éstas se dividían, aproximadamente, en partes iguales entre sistemas húmedos y secos

DIGESTIÓN HÚMEDA

Es una tecnología muy extendida y bien conocida desde hace décadas debido a su aplicación para la estabilización de biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

El principal factor limitante que condiciona el rendimiento biológico de los reactores en los sistemas húmedos con mezcla completa es la acumulación de sustancias inhibitoras como los ácidos grasos y el amoníaco.

Desde un punto de vista económico, las diferencias entre los sistemas húmedos y secos no son muy relevantes, sin embargo, el consumo de agua es unas 10 veces mayor en los sistemas húmedos respecto a los secos.

DIGESTIÓN SECA

Pueden proporcionar producciones de biogás tan altas como los sistemas húmedos (Mata-Álvarez, 2002) y la necesidad de un pretratamiento es menor. Sin embargo, el manejo, bombeo y mezcla de los biosólidos supone una mayor complejidad.

Existen 3 tipos de sistemas secos en una etapa:

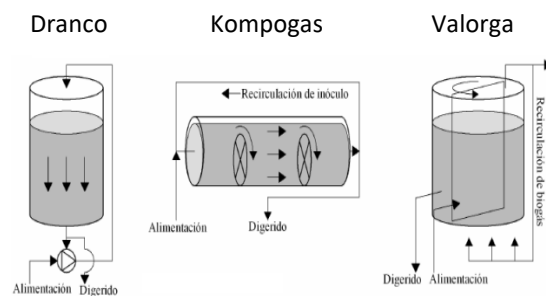


Figura 16. Digestores sistema seco, una etapa. Fuente: <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/3105>

SISTEMA DE DOS ETAPAS

Se emplea cuando las reacciones bioquímicas que conducen a la conversión del biorresiduo en biogás no comparten necesariamente las mismas condiciones ambientales óptimas. Es por ello, que las reacciones se optimizan por separado para posteriormente mejorar el proceso en conjunto.

La principal ventaja de los sistemas de dos etapas respecto a los de una es la mayor seguridad frente a los residuos que causan inestabilidades en los sistemas de una etapa. Esta utilidad se debe a la complejidad técnica de estos sistemas, sin embargo, esto no implica necesariamente que los rendimientos sean los esperados

Sistemas discontinuos:

En este proceso, los digestores se cargan una vez con el residuo fresco (lixiviado) y se le hace pasar por las fases de degradación secuencialmente en un régimen seco. En la actualidad, los sistemas discontinuos o por lotes, no han tenido un éxito comercial significativo. Sin embargo, características tales como su sencillez de diseño y control del proceso, su robustez frente a gruesos y contaminantes y sus bajos costes de inversión, los hacen atractivos especialmente en zonas poco desarrolladas.

SISTEMA DE UNA ETAPA

El lixiviado es recirculado hacia la parte superior del mismo reactor donde se ha producido. Un inconveniente que se presenta frecuentemente en este sistema de una etapa es el taponamiento del suelo perforado, que provoca la interrupción del proceso de percolación. Es por ello, que se debe limitar el espesor de la capa de biorresiduos en 4 m.

SISTEMA SECUENCIAL (SEBAC)

Esta configuración asegura la inoculación entre los reactores y elimina la necesidad de mezclar el sustrato con material digerido. Las plantas que utilizan sistemas discontinuos tienen producciones de biogás menores que los sistemas de una fase y alimentación continua, no obstante, la inversión es menor.

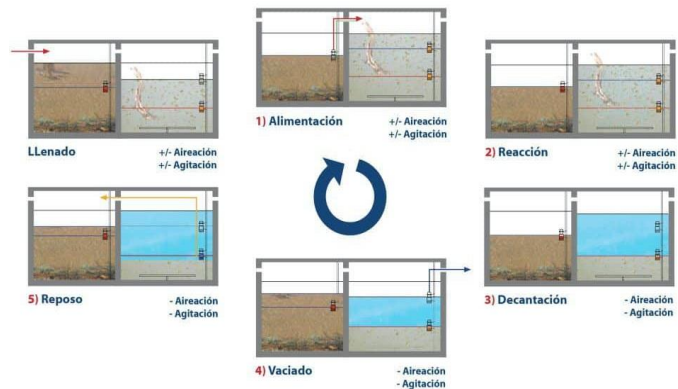


Figura 17. Digestores sistema seco, una etapa. Fuente: [SBR - Reactor Discontinuo Secuencial - Bioazu!](#)

A continuación, se resumen en la siguiente tabla todas las tecnologías vistas y aprovechables para materializar el proceso anaerobio:

Tabla 7. Tecnologías vistas en la Biometanización. Fuente: Elaboración propia

SISTEMA	DENOMINACIÓN	CONFIGURACIÓN
Continuo una etapa	Digestión húmeda (ST<15%)	Reactor de mezcla completa
	Digestión seca (20-40% ST)	Reactor de flujo pistón
Continuo dos etapas	Sin retención de biomasa	2 reactores de mezcla completa o de flujo pistón.
	Con retención de biomasa	Primer reactor de mezcla completa y segundo con retención de biomasa (fracción líquida)
Discontinuo	---	Recirculación de lixiviado y percolación

En base a los criterios técnicos, biológicos y económico/ambientales, se muestra una tabla resumen con las características más destacables en los sistemas de tratamiento continuo (seco de una etapa) y discontinuo:

Tabla 8. Características de los sistemas continuos. Fuente: Elaboración propia

CRITERIO	SISTEMAS SECOS DE UNA ETAPA		SISTEMAS DISCONTINUOS	
	VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Técnico	Sin partes móviles en el reactor Robustos (no hay que quitar inertes y plásticos)	No se pueden tratar residuos húmedos solos	Simples Robustos	Problemas de obstrucción Es necesario agente estructurante Riesgo de explosión en el vaciado
Biológicos	Menor pérdida de SV en pretratamientos Resistencia frente a aumentos transitorios de inhibidores	No se pueden diluir los inhibidores con agua	Sistema fiable debido a nichos y uso de varios reactores	Baja producción de biogás Baja carga orgánica
Económico y ambiental	Pretratamientos baratos y reactores pequeños Poco uso de agua y poca generación de efluente Menos necesidades de calefacción	Equipos más robustos y caros que los sistemas húmedos	Bajo coste de inversión Poco uso de agua y poca generación de efluente	Necesidad de grandes superficies (comparable a compostaje)

El proceso que se lleva cabo en las plantas de biometanización se componen de las etapas siguientes, aunque siempre pueden hacer variaciones ([Figura 18](#)):

1. Un tratamiento del material de entrada para poder recuperar la materia seca que pudiese aparecer mezclada junto con el residuo biodegradable, es decir, una selección más o menos compleja según el origen de los residuos y el tipo de recogida establecido. Selección que coincide con la realizada en las instalaciones de compostaje.
2. Acondicionamiento del material para su digestión mediante un proceso de homogeneización en el que se reduzca la granulometría, se ajuste del contenido en sólidos totales y se mezcle con el efluente recirculado.
3. El proceso de digestión anaerobia, donde se consigue la eliminación de materia volátil (40-60%) y produce la inactivación de organismos patógenos. No obstante, se considera un proceso difícilmente controlable y sujeto a posibles distorsiones.
4. Deshidratación y separación de fases líquida/sólida, para poder tratar por separado la fracción líquida del digestato, de las aguas residuales generadas (lixiviados).
5. Maduración y afino de la fracción sólida del digestato mediante la estabilización aerobia. Este proceso es parejo al empleado en la línea de tratamiento biológico para la obtención de compost.

6. Recogida y aprovechamiento del biogás producido, que puede ser utilizado para la cogeneración de calor y electricidad, además de poderse purificar e inyectar en la red de distribución de gas o ser utilizado en vehículos.

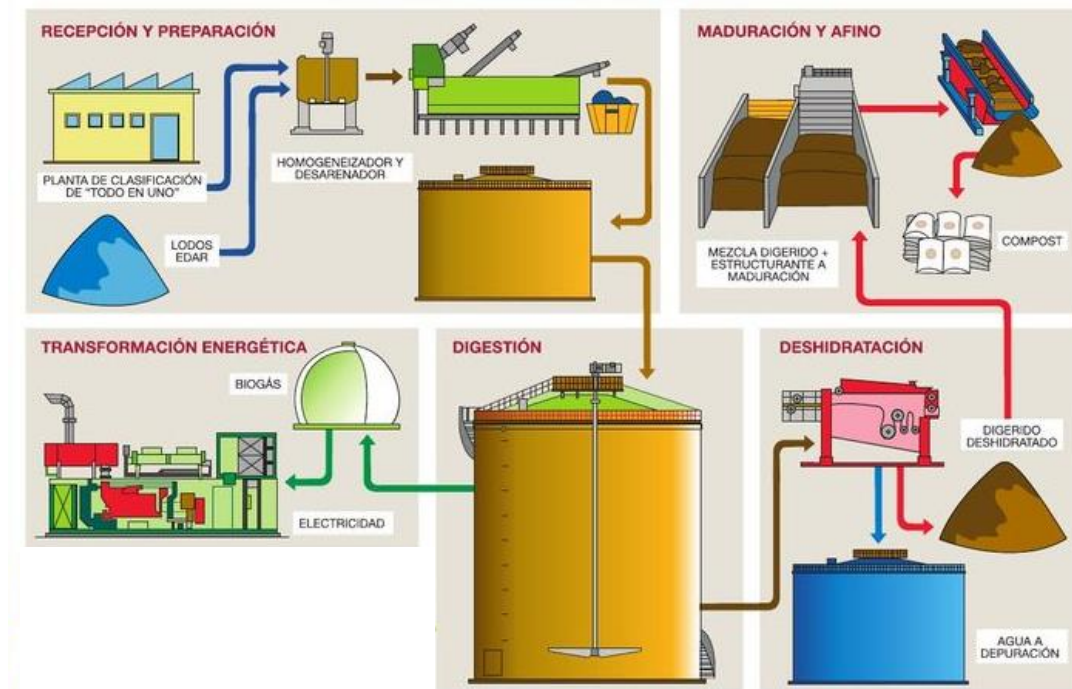


Figura 18. Proceso básico de biometanización. Fuente: [Oxigenorik gabeko konpostajea - Konpostazank!](#)

Por último, cabe señalar la influencia de la calidad de los residuos para la obtención de biogás, ya que, si el material orgánico a tratar no procede de recogida separada en origen, el material posee un alto contenido en materiales no solicitados (impropios), los rendimientos de las instalaciones de biometanización no justifican su coste ni su implantación.

Combustibles alternativos: CDR/CSR.

Considerando las nuevas legislaciones ambientales, se han implementado sistemas de aprovechamiento de energía contenida en los rechazos de las plantas de tratamiento con el fin de reducir el 50% de residuos que son rechazados a vertederos. Residuos que poseen un poder calorífico suficientemente elevado como para emplearlo como combustible alternativo.



Figura 19. Aspecto típico de los CDR. Fuente: cdr290512.pdf

La técnica de fabricación más extendida para la obtención de estos combustibles es la que se basa en el aprovechamiento de los rechazos, de la fracción inorgánica, de las plantas de tratamiento mecánico-biológico (Tabla 9). No obstante, cabe destacar que no todos los tratamientos mecánico-biológicos conllevan la producción de combustibles alternativos de calidad, ya que estas alternativas de recuperación de energía necesitan una composición específica. A continuación, se muestra una clasificación de los combustibles en función de los residuos que emplean para elaborarse:

Tabla 9. Tipo de combustible en función del residuo. Fuente: Elaboración propia

RESIDUO DE ORIGEN	Madera no tratada	Residuos municipales, comerciales e industriales si/no peligrosos	Residuos municipales, comerciales e industriales no peligrosos	Residuos peligrosos: disolventes, aceite usado, etc.	Harinas cárnicas, neumáticos, etc.
CLASSIFICACIÓN DEL COMBUSTIBLE	Biocombustible sólido	Combustible Derivado de los Residuos	Combustible Sólido Recuperado	Combustibles de residuos peligrosos	Combustibles específicos

Dentro de los combustibles alternativos, cabe destacar que la principal diferencia visible en la [Tabla 9](#) entre el Combustible Derivado de Residuo (**CDR**) y el Combustible Sólido Recuperado (**CSR**), se basa en que el primero se obtiene a partir de residuos peligrosos y no peligrosos, sin embargo, el segundo solo se fabrica con residuos no peligrosos y además, debe cumplir la normativa europea CEN/TC 343 en base a 3 valores límite: el valor medio del poder calorífico inferior (PCI) en base húmeda, el valor medio del contenido en cloro en base seca y el contenido de mercurio en relación al PCI. Es por ello, que el CSR posee una mayor calidad respecto del CDR y su campo de aplicación es más amplio dentro de las industrias intensivas que precisan de combustible con elevado poder calorífico, como: las cementeras, las plantas de ciclo combinado, las plantas de cal, las centrales térmicas multicomcombustibles y las calderas industriales.

Las características del CDR son variables debido a la diversidad de residuos de partida y al tratamiento al que se someten. A diferencia del CSR, las características no son homogéneas, no obstante, se han establecido valores característicos mínimos que deben cumplir para asegurar un mínimo de calidad al comprador del combustible. En España, el destino principal de estos combustibles (CSR) son las cementeras, ya que lo utilizan como sustituto del coque de petróleo, es por ello, que necesitan que el material empleado cumpla con una serie de requisitos en cuanto a: homogeneidad, granulometría específica, con un bajo contenido de impurezas, un poder calorífico constante, un contenido de cloro limitado y una humedad específica.

Las características más importantes de los CDR utilizados habitualmente en el sector cementero son:

- Poder calorífico elevado, en torno a 16-18 MJ/kg, aunque algunas plantas de clinker establecen valores bastante más elevados, superiores a 20 MJ/kg.
- Reducido contenido de cloro (inferior al 0,5-1%), por razones de funcionamiento estable de la instalación para no incrementar su coste de mantenimiento.
- Reducido contenido de mercurio, (inferior a 10 mg/kg, en base seca), para poder cumplir las limitaciones de emisiones establecidas en la legislación sobre incineración de residuos.

En la actualidad existen dos métodos para la producción de CDR/CSR:

- 1) Por tratamiento mecánico/físico en plantas MBT.

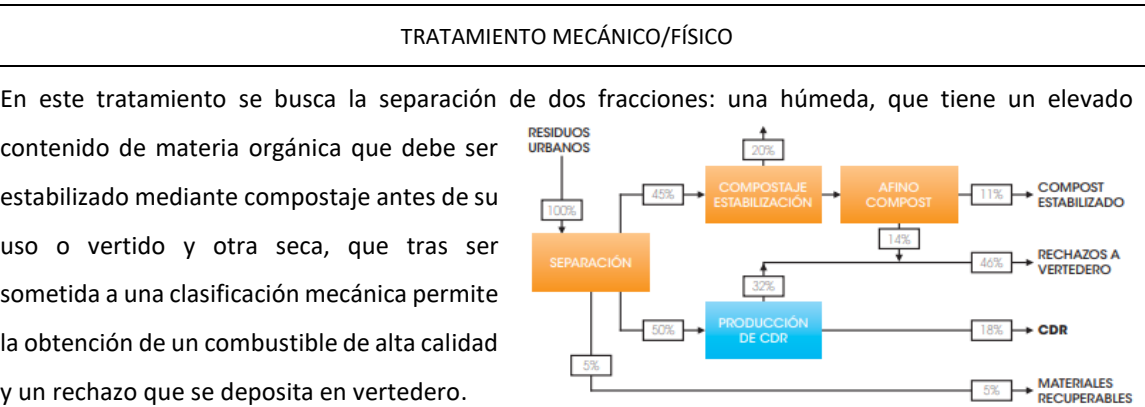


Figura 20. Tratamiento mecánico de los residuos urbanos. Fuente: cdr290512.pdf

- 2) Por biosecado, seguido de una clasificación posterior (en plantas MBT). Este método desarrollado en Alemania recibe el nombre de *Trockenstabilat*.

BIOSECADO

Consiste en un tratamiento biológico donde la masa de residuos recibe una elevada temperatura alcanzando unos 50-60°C en su interior. Durante el proceso aeróbico se evapora el agua contenida en los residuos y se degrada parte de la materia orgánica, reduciendo en un 25-30% el peso e higienizando el material restante.

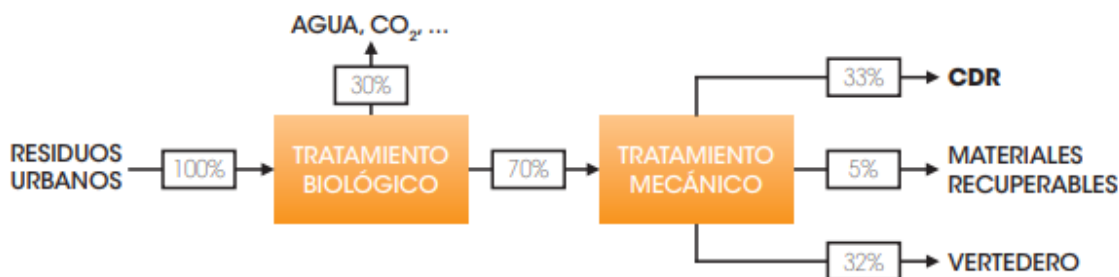


Figura 21. Tratamiento por biosecado de los residuos urbanos. Fuente: cdr290512.pdf

Para una mejor comprensión de los pros y contras de esta tecnología alternativa, a continuación, se compara el CDR frente a la incineración de material combustible sin procesar:

Ventajas: presenta un poder calorífico elevado, y el contenido de humedad y cenizas es bajo. Se pueden producir combustibles derivados de residuos «a demanda», es decir, según las necesidades del mercado. Los combustibles derivados de residuos se pueden producir en cualquier sitio e incluso en pequeñas cantidades, se pueden almacenar, son fáciles de transportar y son exportables y existe una normativa que regula los combustibles sólidos recuperados, lo cual amplía significativamente sus posibilidades de comercialización.

Desventajas: su producción es cara y se pierde material para reciclaje. Sigue siendo necesario eliminar la fracción fina descartada o someterla a otro tratamiento. Los combustibles producidos a partir de residuos se consideran residuos, por lo que están regulados por la legislación relativa a incineración de residuos (los gases de combustión son perjudiciales para el medioambiente) y se tiene que almacenar con mucha precaución, ya que los materiales ricos en sustancias orgánicas son susceptibles de inflamación espontánea.

Las fases son las siguientes:

- Recepción de basuras, donde se necesita de una plataforma de descarga y un foso de almacenamiento en el que verter los residuos.

- Trituración, a tamaño 25-30 cm para homogeneizar el material. También se lleva a cabo la rotura de las bolsas de basura.
- Estabilización y biosecado. Consiste en la evaporación de la parte húmeda contenida en los residuos mediante la circulación de una corriente de aire forzada y el calor producido en las reacciones de degradación aeróbica de la materia orgánica. El proceso tiene una duración aproximada de 14 a 15 días.
- Tratamiento de gases, mediante un biofiltro que actúa como un sistema biológico de depuración de gases.
- Afino (preparación del CSR/CDR), se procede a la extracción de metales férreos y no férreos, seguido de una trituración tras el cribado para conseguir el tamaño requerido por el consumidor final. La fracción fina que resulta de esta fase se trata como un rechazo. Se obtiene un producto con un poder calorífico elevado (del orden de 14.000-16.000 KJ/kg) que se prensa dando lugar a unos materiales de mayor densidad, lo que facilita su transporte y manipulación.
- El producto preparado está en condiciones para ser enviado a las plantas de valorización energética. En el caso de que su destino sea preparar combustibles con destino a hornos industriales, se debe introducir la mezcla en un trómel con el objetivo de separar el rechazo y el producto final.

En España más de un 75 % de los residuos urbanos se recogen de forma mezclada, por lo que hay mucho margen de mejora de los resultados de recogida selectiva y de reciclaje, operaciones que de acuerdo con la jerarquía establecida por la Directiva Marco de Residuos son prioritarias a la valorización energética. En este contexto, la producción de CDR a partir de residuos municipales constituye una subversión de la jerarquía de residuos y el desaprovechamiento de una gran cantidad de materiales recuperables valiosos

Incineración.

La incineración es un proceso de oxidación completa (en exceso de aire) de los elementos combustibles de los residuos (principalmente carbono e hidrógeno) a temperaturas superiores a 850°C (900-1200°C). Cabe destacar, que las centrales incineradoras de rechazos de RSU pueden dedicarse a la incineración con o sin recuperación de la energía (Figura 22).

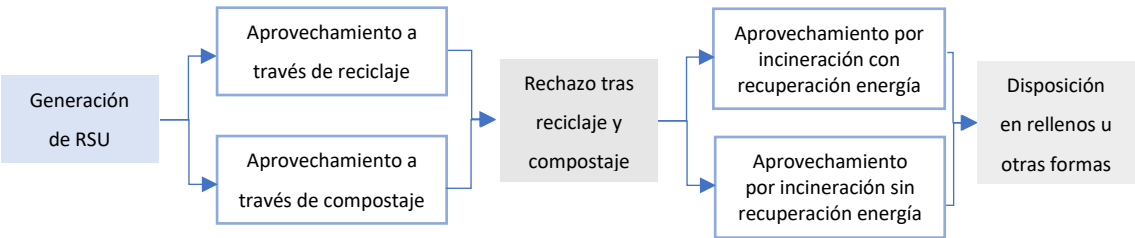


Figura 22. Esquema del aprovechamiento de los RSU con incineración. Fuente: elaboración propia.

El objetivo último de la incineración de los RSU es la transformación de los residuos combustibles en residuos inertes, con una reducción muy importante de peso y volumen. No obstante, el rendimiento de este proceso se ve mermado por la elevada heterogeneidad de los residuos, ya que la mayor parte de los desechos ni son clasificados, ni sufren una trituración previa a la incineración para mejorar las condiciones de combustión. Asimismo, este proceso, pese a reducir notablemente el volumen de residuos sólidos, no tiene buena aceptación social debido al contenido de metales pesados en los gases emitidos por la chimenea (plomo, cinc, cadmio, mercurio, cobre, cromo, níquel, manganeso) y a los residuos sólidos resultantes de la combustión, que son: las escorias o cenizas de fondo, las cenizas volantes y los residuos de la depuración húmeda. Productos sólidos cuyo posterior tratamiento debe ser gestionado.

A continuación, se muestra una tabla con las características más relevantes para conseguir un funcionamiento eficiente del proceso:

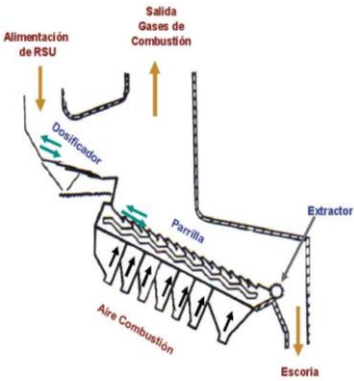
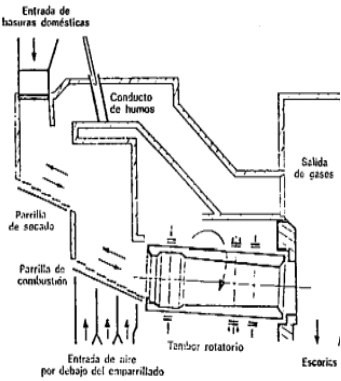
Tabla 10. Características de la incineración. Fuente: Elaboración propia.

TECNOLOGÍA	CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS	CARACTERÍSTICAS EXTRÍNSECAS
INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA	Contenido calórico (poder calorífico)	Tecnología de incineración disponible y su eficiencia energética
	Contenido de humedad (baja humedad para maximizar la combustión)	Normativas ambientales sobre emisiones (dioxinas, CO2, etc.)
	Fracción inorgánica (residuos metálicos y vidrio que no pueden incinerarse)	Costos operativos de la planta de incineración

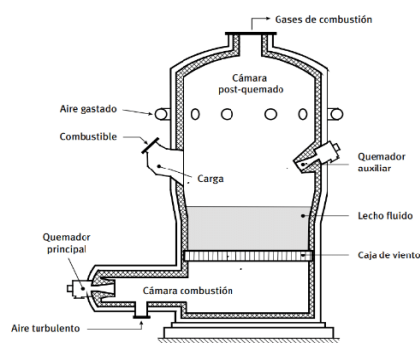
La instalación básica de la incineración desde el punto de vista técnico es el horno. El horno puede dividirse en dos partes fundamentales, parrillas y anexos y la cámara de combustión. Los tipos de hornos en función de su funcionamiento pueden ser: discontinuos, continuos de parrilla, rotativos o mixtos y de lecho fluidificado.

HORNOS DISCONTINUOS
Consisten en una cámara, protegida por material refractario, donde se introducen los residuos, se queman completamente y, por último, se evacuan las escorias producidas. Están prácticamente en desuso. Exigen la utilización de un combustible auxiliar de elevado poder calórico y sólo pueden usarse para pequeños núcleos urbanos. Pueden ser adecuados por su más perfecto quemado de los residuos en el caso de hospitales.

HORNOS CONTINUOS
Todas las funciones se realizan de forma continuada y automática. Actualmente estos hornos son prácticamente los únicos que se utilizan alcanzando producciones de 50 t/h.

DE PARRILLAS	ROTATIVO	MIXTO
Es el más común. Existen múltiples sistemas que permiten el movimiento de las parrillas, asegurando el movimiento de los residuos y a la vez su volteo.	Aplican la tecnología utilizada en las fábricas cementeras. Es un cilindro inclinado que gira sobre sí mismo, a través del cual pasan los RSU. Se usan para pequeñas capacidades.	Combina ambos sistemas, utilizando el rotativo para asegurar el acabado de la combustión. Pueden utilizarse para grandes capacidades.
 Figura 23. Funcionamiento del horno de parrilla. Fuente: ENERGIA A DEBATE.	 Figura 24. Funcionamiento del horno rotativo. Fuente: TFG, Soto Fuster.	 Figura 25. Funcionamiento del horno mixto. Fuente: TFG, Soto Fuster.

HORNOS DE LECHO FLUIDIFICADO



Consiste en un cilindro vertical de acero, forrado con ladrillos refractarios, un lecho de arena, una placa de rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire. Cuando se fuerza el aire hacia arriba, el lecho se fluidifica expandiendo su volumen. La acción hirviente del lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla y transfiere calor al combustible. Son bastante versátiles

Pese al rechazo social al respecto de la incineración, la mejora del proceso de combustión mediante el aprovechamiento energético es un proceso muy utilizado en Europa. Esta tecnología consiste en una combustión con generación de vapor en un horno-caldera y la posterior expansión de éste en una turbina convencional acoplada a un generador eléctrico para producir electricidad. Además, la incineración de residuos con aprovechamiento energético posee grandes ventajas, entre las cuales están:

1. No necesitar un pretratamiento de residuos, excepto en el caso de utilizar horno de lecho fluido.
2. La energía producida es considerada como energía renovable.
3. El poco espacio necesario para instalar las estaciones incineradoras.
4. La reutilización del material orgánico incombustible (rechazo) se utiliza para obra pública.
5. Autosuficiencia de las instalaciones incineradoras.

En el proceso de incineración con recuperación de energía, independientemente de la tipología de horno que se implante en función de los rendimientos necesarios y los RSU entrantes, las fases del proceso son las siguientes ([Figura 26](#)):

- Recepción de basuras y carga de hornos:
 - Instalaciones de pesaje → en muchos casos esto se realiza de forma automática para tener un control del volumen de residuos entrantes.
 - Plataforma de descarga → precede al foso de almacenamiento. Debe ser lo suficientemente amplia como para permitir la maniobra de los vehículos.
 - Foso de almacenamiento → es el lugar donde se efectúa el vertido de los residuos y su función es la de depósito regulador para la alimentación de los hornos.
 - Puente grúa → se utiliza para trasladar los residuos del foso de almacenamiento a las instalaciones de carga de los hornos.
- Hornos:
 - Parrillas y anexos → su finalidad es asegurar la combustión de los residuos, permitiendo su manipulación.

- Cámara de combustión → se sitúa directamente sobre las parrillas y permiten la combustión completa de los gases antes de su salida del horno.
- Instalaciones de tratamiento de los productos resultantes:
 - Extracción y evacuación de escorias → el sistema debe enfriarlas y extraerlas manteniendo la estanqueidad del horno usualmente mediante la inmersión en agua.
 - Enfriamiento de los gases → se realiza en las instalaciones sin recuperación de calor, en la cámara de enfriamiento, mediante la inyección de aire terciario o agua.
 - Recuperación del calor → solo se llevará a cabo en caso de que sea rentable. La venta es posible técnicamente si el calor, en forma de vapor o electricidad se suministra con regularidad, lo cual exige que el PCI de los residuos a incinerar supere las 1.000 kcal/kg.

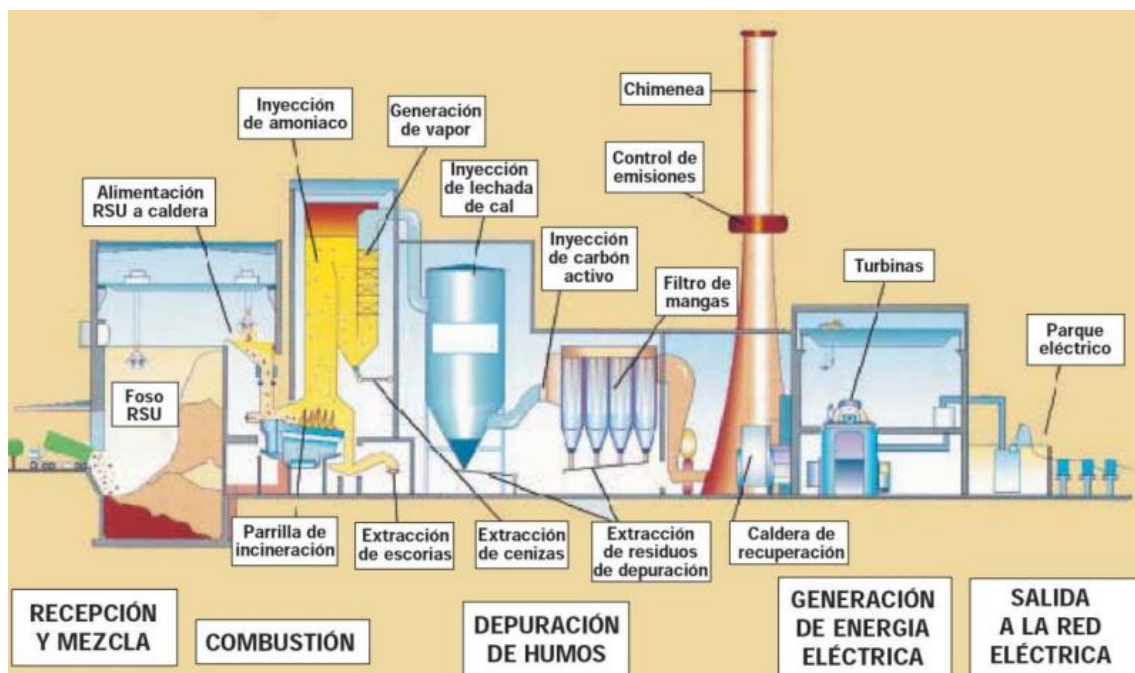


Figura 26. Esquema de una planta incineradora. Fuente: [TFG, Soto Fuster](#).

3. PROPUESTA METODOLÓGICA

3.1. Introducción

En los procesos de planificación y diseño de instalaciones de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) se enfrentan simultáneamente múltiples desafíos derivados de la complejidad del problema de decisión. Por un lado, existen diversas **alternativas** que, con sus respectivos condicionantes, abarcan tanto posibles **emplazamientos**, como diversas **tecnologías de tratamiento** consolidadas o emergentes: compostaje, digestión anaerobia, incineración con recuperación energética y producción de combustibles derivados de residuos, entre otras. Por otro lado, cada alternativa debe evaluarse según múltiples **criterios**, que comprenden ámbitos técnico, económico, ambiental y sociocultural, y se expresan en unidades heterogéneas (€/t, ha/t, índices de emisión, porcentajes de recuperación, etc)¹⁹.

La coexistencia de las múltiples dimensiones impide una simple comparación directa y hace imprescindible la adopción de un enfoque estructurado capaz de²⁰:

1. **Estandarizar las unidades de medida** mediante procedimientos de normalización vectorial, de modo que cada criterio contribuya de forma equilibrada al análisis global.
2. **Incorporar ponderaciones** que reflejen la importancia relativa de cada criterio, ya sea a través de juicios de expertos o de técnicas objetivas como el método de Montecarlo, garantizando una asignación de pesos transparente y reproducible.
3. **Obtener un ranking objetivo** de alternativas, minimizando la influencia de sesgos subjetivos y facilitando la defensa técnica de la decisión final.

Sin la implementación de un método multicriterio, la elección podría fundamentarse en juicios parciales o en la optimización de un único indicador, ignorando la relación de dependencia entre criterios u objetivos que se encuentran en conflicto, donde para mejorar uno, se debe sacrificar o reducir el valor de otro, lo que conllevaría decisiones difíciles de justificar ante los distintos grupos de interés. En consecuencia, la correcta implantación de la propuesta metodológica exige la ejecución de las siguientes fases:

- Selección del método multicriterio. Elegir la técnica de evaluación más adecuada, en función de sus características, alcance y capacidad para gestionar criterios heterogéneos.
- Identificación de alternativas. Integrando las dos dimensiones esenciales en la planificación:

La **ubicación**, atendiendo a aspectos normativos, logísticos, ambientales y socioculturales.

La **tecnología**, considerando factores técnicos, económicos, medioambientales y operativos.

¹⁹ <https://ugr.es/~ceat/tblog/mcdapost.html>.

²⁰ ResearchGate

- Definición de criterios y subcriterios. Establecer indicadores cuantificables y contrastables para cada dimensión, de modo que todas las valoraciones puedan trazarse hasta su origen y se minimice la subjetividad.
- Determinar los pesos (método Montecarlo). Asignar distribuciones de peso a los distintos criterios y evaluar la sensibilidad del ranking final ante variaciones en dichas ponderaciones.
- Formulación de conclusiones. Analizar los resultados obtenidos, destacando las alternativas óptimas y reflexionando sobre las implicaciones prácticas y las limitaciones derivadas de los supuestos metodológicos.

Por último, conviene destacar que, antes de iniciar el desarrollo de las fases metodológicas descritas, es imprescindible llevar a cabo un estudio preliminar del caso práctico en el que se aplicará la metodología. Este análisis previo permite recopilar y estructurar toda la información relevante del contexto específico y, en su caso, establecer hipótesis o simplificaciones justificadas. Dicho proceso resulta esencial para asegurar la coherencia interna, la solidez técnica y la exhaustividad del análisis multicriterio posterior.

3.2. Selección del método multicriterio

En contextos de toma de decisiones complejas, caracterizados por la presencia simultánea de múltiples alternativas, criterios heterogéneos y restricciones normativas, se hace imprescindible la utilización de un método de análisis multicriterio que proporcione, de forma integrada, intuitiva y fácil de interpretar: eficiencia computacional, capacidad para gestionar criterios de beneficio y de coste, y una clasificación clara y objetiva de las alternativas. Por ello, resulta fundamental seleccionar y fundamentar adecuadamente el método de decisión multicriterio más adecuado para el problema en cuestión. En este sentido, la literatura especializada distingue habitualmente dos grandes categorías de métodos:

- **Análisis multicriterio continuo**, basado en formulaciones de programación matemática (multiobjetivo, por metas o por compromiso) que generan frentes de Pareto y requieren modelos continuos de variables e incertidumbres²¹.
- **Análisis multicriterio discreto**, que opera sobre conjuntos finitos de alternativas mediante técnicas tales como métodos de puntuación directa, métodos de distancia (como TOPSIS), métodos de sobreclasificación (ELECTRE, PROMETHEE), métodos de utilidad/valor y métodos de comparación a pares (AHP, ANP)²².

El análisis multicriterio discreto presenta una serie de características que lo diferencian claramente de los enfoques continuos y lo hacen especialmente adecuado para situaciones en las que el conjunto de alternativas está previamente definido y es finito, como en la gestión de residuos sólidos urbanos. A diferencia de los métodos continuos, que requieren la formulación de funciones objetivo y restricciones algebraicas para operar sobre un espacio de soluciones potencialmente infinito, los métodos discretos permiten trabajar directamente con alternativas concretas, facilitando su aplicación práctica en contextos reales con datos disponibles y fácilmente estructurables. Además, el análisis discreto permite integrar tanto criterios cualitativos como cuantitativos, normalizar unidades heterogéneas y establecer prioridades mediante ponderaciones, generando resultados más fácilmente interpretables y defendibles. Por estas razones, al diseñar una propuesta metodológica como la aquí presentada, es imprescindible realizar una justificación rigurosa de la elección del método multicriterio a emplear en el caso práctico, considerando las características específicas del problema, los datos disponibles, los objetivos del análisis y el grado de complejidad que se desea asumir.

La selección del método multicriterio debe estar debidamente justificada y respaldada por criterios técnicos, operativos y conceptuales que aseguren la coherencia y eficacia del análisis. No obstante, como punto de partida, se recomienda el uso del método TOPSIS, dada su adecuación a este tipo de contextos por su claridad metodológica, facilidad de aplicación y capacidad para gestionar múltiples criterios de forma estructurada.

²¹ [ScienceDirect](#)

²² [Taylor & Francis Online](#)

3.3. Identificación de alternativas

Para garantizar la aplicabilidad de la metodología en cualquier escenario, la fase de identificación de alternativas se estructura en dos grupos: **ubicaciones potenciales** y **tecnologías de tratamiento**. Estos conjuntos conforman las filas de la matriz de análisis multicriterio seleccionada y, sobre ellos, se despliegan los pasos generales para su identificación, descritos a continuación:

REVISIÓN NORMATIVA Y DE PLANIFICACIÓN	Compilar la legislación aplicable (zonificación, uso del suelo, distancias mínimas a núcleos de población y áreas sensibles, criterios de cierre y restauración).
	Identificar limitaciones urbanísticas y ambientales (planes de ordenación, áreas protegidas, zonas de riesgo geológico o hidrológico).

GENERACIÓN DEL CATÁLOGO DE ALTERNATIVAS	Mapear y recopilar posibles emplazamientos (bases catastrales, inventarios de suelo industrial) y tecnologías (MTD, directivas europeas y referencias sectoriales).
	Documentar para cada opción su localización (ubicación) y características técnicas más relevantes (tecnologías). Recoger datos cuantitativos y cualitativos (accesibilidad, infraestructura disponible, coste estimado, etc).

APLICACIÓN DE FILTROS INICIALES	Descartar alternativas que no cumplan requisitos básicos normativos o de seguridad. Hacer uso de las Mejores Técnicas Disponibles recogidas en la Directiva 2010/75/UE y documentos sectoriales.
	Mantener condiciones heterogéneas y realistas: reconocer que no todas las ubicaciones y tecnologías pueden gestionar idénticos volúmenes de RSU.

El proceso de identificación debe diseñarse como un ciclo iterativo de retroalimentación, en el que el catálogo inicial de alternativas se refine mediante la aplicación de los filtros preliminares. De este modo, se obtiene un conjunto definitivo de opciones que se ajustan a las hipótesis de partida sobre las que se basará el análisis multicriterio.

Cabe señalar que estos dos ámbitos de alternativas, las ubicaciones potenciales y las tecnologías de tratamiento, representan de forma integral los principales retos y dimensiones asociadas a la gestión de residuos sólidos urbanos. Su adecuada identificación y caracterización constituye la base fundamental para garantizar un análisis multicriterio riguroso, realista y aplicable a cualquier caso práctico.

3.4. Definición de criterios y subcriterios.

Antes de exponer los criterios estandarizados y su forma de medición, resulta necesario distinguir dos conjuntos de indicadores: los que se emplean para evaluar la ubicación de las instalaciones y aquellos destinados a calificar la tecnología de tratamiento. Aunque ambos persiguen el mismo objetivo, identificar la alternativa más adecuada para la gestión de residuos sólidos urbanos, sus finalidades y requisitos metodológicos difieren, por lo que su separación es imprescindible para garantizar una valoración precisa y coherente.

- **Criterios de emplazamiento:** Para asegurar un análisis riguroso y ajustado al marco normativo, los criterios aplicables a la localización de las instalaciones se extraen de la legislación sectorial sobre gestión de vertederos y valorización de residuos. En particular, se han tomado como referencia los requisitos establecidos en el anexo correspondiente del Reglamento de Vertederos (actualmente recogido en el **Real Decreto 646/2020, de 7 de julio**, que regula las condiciones generales de emplazamiento y operación). Cada criterio derivado de esta normativa se convierte en un indicador cuantificable que permite comparar alternativas de forma objetiva.
- **Criterios tecnológicos:** El análisis de las tecnologías disponibles exige una metodología adaptada a la escasa información pública sistematizada. Por ello, se han seleccionado como base los criterios definidos en el **Anexo III de la Directiva 2010/75/UE** sobre emisiones industriales y se han complementado con aquellos aportados por documentos técnicos de **Mejores Técnicas Disponibles** (MTD). De este modo, se cubren aspectos como eficiencia, emisiones, consumo de recursos y flexibilidad operativa.

Al definir los criterios y subcriterios para cada dimensión (emplazamiento y tecnología), resulta imprescindible considerar, al identificar los subcriterios, los siguientes aspectos:

1. **Desagregación de criterios:** cada criterio principal ha de subdividirse en subcriterios específicos que recojan sus distintas facetas. Por ejemplo, el criterio “impacto ambiental” podrá segmentarse en emisiones de CO₂, uso de suelo y generación de residuos secundarios.
2. **Establecimiento de unidades y escalas:** para los subcriterios cuantitativos, se deberán emplear unidades homogéneas y fácilmente comprensibles (€/t, ha/t, kg CO₂/t, etc.). En el caso de los subcriterios cualitativos o de difícil medida directa, será necesario definir una escala normalizada (por ejemplo, de 1 a 5), especificando con precisión los rangos de valores que corresponden a cada nivel (p. ej., para el subcriterio “nivel de implementación tecnológica”: 1 = menos de 2 plantas operativas en el país; 5 = más de 10 plantas operativas).

A continuación, se presentan las tablas resumen con los criterios y subcriterios propuestos para ambas dimensiones, así como las pautas de cuantificación asociadas a cada uno.

CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN		
SUBCRITERIOS	DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS	EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS
	CATEGORÍA ECONÓMICO-OPERACIONAL	
Distancia De Transporte	Busca minimizar los costes económicos del transporte, valorando positivamente la proximidad entre la planta (con vertedero) y el origen de los residuos para reducir consumo de combustible, emisiones y tiempo de transporte.	Se cuantifica en kilómetros la distancia por carretera entre la estación de transferencia de RSU la zona y cada una de las localizaciones propuestas. El cálculo considera rutas que eviten tanto peajes como áreas urbanas, priorizando recorridos por vías principales.
Disponibilidad De Terreno	Se requiere un área adecuada para albergar ambas infraestructuras, garantizar su operación y prever la clausura y reutilización del terreno, evaluando la extensión y la idoneidad del uso del suelo.	Se expresa en hectáreas la superficie disponible para la implantación de las instalaciones, incluyendo tanto la infraestructura como el área operativa del vertedero. Cuanto mayor sea el área disponible, más favorable será la alternativa.
Acceso Al Lugar	La accesibilidad para una logística eficiente, valorando la calidad de las conexiones viales, la existencia de múltiples accesos y la necesidad de adaptar los viales de conexión para el tráfico pesado, lo que impacta en los costes y la seguridad.	Se mide en kilómetros la longitud del tramo de vía que requiere acondicionamiento para permitir el acceso de vehículos pesados, es decir, el tramo que va desde la carretera principal más cercana hasta la ubicación del vertedero.
Vida útil	Se define como el volumen máximo de residuos que puede albergar el emplazamiento elegido. Un valor más elevado indica una mayor vida útil operativa, al retrasar el llenado hasta su capacidad límite.	Medida en metros cúbicos de capacidad útil disponible para la disposición de residuos. Una mayor capacidad implica una mayor duración operativa del emplazamiento.

SUBCRITERIOS	CATEGORÍA AMBIENTAL	
Restricciones En La Localización	Excluye áreas de riesgo o sensibilidad ambiental, como proximidades a aeropuertos, terrenos aluviales, zonas húmedas, vías fluviales, áreas inestables y zonas cercanas a núcleos urbanos o industriales, garantizando la seguridad y viabilidad.	Se cuantifica en metros la distancia mínima entre el emplazamiento propuesto y el núcleo urbano más cercano, con el objetivo de minimizar impactos sociales, sanitarios y paisajísticos.
Condiciones Geológicas e Hidrogeológicas	Evalúa la capacidad del terreno para garantizar la estabilidad del vertedero y la contención de lixiviados. Es decir, formaciones geológicas que actúen como una barrera natural.	Se evalúa la permeabilidad del terreno en cada alternativa, siendo preferibles terrenos de baja permeabilidad para evitar filtraciones contaminantes.
Hidrología De Aguas Superficiales	Prioriza la protección de los recursos hídricos, evitando la ubicación en áreas con cauces o riesgo de inundación que puedan comprometer la calidad del agua.	Se mide en metros la distancia entre las instalaciones y el cuerpo de agua superficial más cercano (ríos, arroyos, lagunas), con el objetivo de reducir riesgos de contaminación hídrica.
Urbanismo y Restricciones Ambientales	Evaluar el impacto ambiental, incluyendo la biodiversidad y proximidad a áreas protegidas (ZEPA, LIC, Parques Naturales, etc.), con el objetivo de minimizar afectaciones al ecosistema.	Se expresa en metros la distancia desde el emplazamiento hasta las zonas protegidas, de interés natural o patrimonial, conforme a la normativa vigente en materia urbanística y ambiental.
Condiciones Ambientales Locales	Integrar coherentemente los planes de mitigación en el entorno urbanístico y ambiental, garantizando la mínima afección acústica debido a la acción antrópica.	Se mide en euros el coste de elaboración de un estudio acústico, ya que, en Orihuela, a diferencia de Albaterra se exige su elaboración, ya que se rige por un Plan Acústico Municipal (PAM).

SUBCRITERIOS	CATEGORÍA TÉCNICA	
Condiciones Del Suelo y Topografía	Determina la idoneidad del terreno para la construcción y operación, considerando la estabilidad del suelo, disponibilidad de material y la influencia de la topografía en las actividades operativas.	Se mide la pendiente media del terreno en porcentaje (%), considerando que pendientes suaves son más favorables para la construcción y operación del vertedero.
Condiciones Climatológicas	Analiza factores climáticos como precipitaciones, heladas y viento, ya que pueden afectar el acceso, la operatividad del sitio, la gestión de aguas superficiales y la dispersión de materiales.	Se cuantifican las precipitaciones medias anuales en milímetros (mm), dado que mayores niveles de precipitación pueden aumentar la lixiviación y los riesgos asociados a la gestión del vertedero.
SUBCRITERIOS	CATEGORÍA SOCIOCULTURAL	
Aspectos Socioculturales	Es esencial evaluar los impactos en la calidad de vida de las comunidades cercanas y establecer medidas de mitigación que favorezcan la viabilidad del proyecto, evitando el fenómeno NIMBY ("Not In My BackYard").	Se evalúa en kilómetros la longitud de vías urbanas afectadas por el paso de vehículos de transporte de RSU, considerando el impacto sobre la calidad de vida y la seguridad de la población.

CRITERIOS DE TECNOLOGÍA		
SUBCRITERIOS	DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS	EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS
	CATEGORÍA TÉCNICA	
Implementación	Hace referencia al grado de implantación y madurez de una tecnología específica en el contexto nacional. Este subcriterio evalúa la facilidad técnica y operativa para instalar la tecnología, especialmente en infraestructuras ya existentes, como plantas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) o estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Se valoran positivamente, las soluciones ya probadas a escala industrial y aquellas que presentan compatibilidad con las condiciones locales de operación.	1: Tecnología en fase experimental o piloto; sin referencias de aplicación industrial. 2: Implementaciones limitadas a entornos específicos; escasa experiencia nacional. 3: Presencia moderada a nivel nacional; algunas plantas operativas; limitada integración en TMB/EDAR. 4: Tecnología consolidada; implantación significativa en el país o región; integración funcional comprobada. 5: Tecnología ampliamente implantada; estándar en el sector nacional; plena integración en infraestructuras existentes.
Robustez tecnológica	Se refiere a la capacidad del sistema para mantener un funcionamiento estable y eficiente ante variaciones significativas en la composición de los residuos sólidos urbanos. Este subcriterio considera la tolerancia frente a mezclas heterogéneas, presencia de fracciones inertes o elevados niveles de humedad, aspectos frecuentes en flujos de entrada no homogéneos.	1: Requiere residuos homogéneos y pretratados; operación muy sensible a inertes, humedad o impurezas 2: Tolerancia limitada a variaciones; requiere ajustes operativos frecuentes. 3: Tolerancia moderada; funcionamiento estable con residuos parcialmente heterogéneos. 4: Buena tolerancia; mantiene rendimientos aceptables sin pretratamiento exhaustivo. 5: Alta robustez; mantiene funcionamiento óptimo frente a cambios significativos en la composición del residuo.

Capacidad de ampliación	Analiza la facilidad con la que la tecnología puede ser ampliada en términos de capacidad instalada, tanto a nivel espacial (superficie requerida) como logístico (infraestructura de apoyo, accesos, almacenaje, etc.). También se evalúa el modularidad del sistema y su flexibilidad técnica para responder a un incremento progresivo de la demanda de tratamiento.	1: Escalabilidad muy limitada; requiere rediseño completo para ampliar capacidad. 2: Ampliación compleja; necesita obras importantes y condicionantes técnicos significativos. 3: Posibilidad de ampliación moderada; depende de espacio y disponibilidad de infraestructura. 4: Escalabilidad funcional con modificaciones moderadas; diseño parcialmente modular. 5: Alta escalabilidad; diseño modular o adaptable, con ampliación sencilla en espacio, logística y operación.
Nivel de especialización operativa	Este subcriterio valora el grado de cualificación técnica necesario para la operación y mantenimiento del sistema. Se consideran el tipo y nivel de formación del personal requerido, así como la disponibilidad de perfiles profesionales especializados en el entorno nacional o regional. Tecnologías que requieren menor especialización presentan generalmente mayores ventajas en contextos con capacidades técnicas limitadas.	1: Requiere operadores con alta cualificación técnica y formación específica continua. 2: Necesita personal técnico con formación avanzada y experiencia en procesos complejos. 3: Nivel medio de especialización; formación técnica específica, pero de acceso general. 4: Requiere formación técnica básica; operación relativamente sencilla. 5: Muy baja especialización; operación accesible a personal con formación general y capacitación breve.
Adaptabilidad funcional	Evalúa la capacidad de la tecnología para integrarse o coexistir con otros sistemas de tratamiento ambiental ya existentes (como TMB, EDAR u otras infraestructuras de gestión de residuos), así como su flexibilidad para	1: Incompatible con infraestructuras existentes; difícil integración y nula flexibilidad normativa. 2: Integración limitada; necesita cambios estructurales o legales. 3: Integración viable con ajustes técnicos; adaptable a futuras normativas.

	ajustarse a cambios normativos, mejoras tecnológicas futuras o nuevas exigencias funcionales. Se valora positivamente la interoperabilidad y la posibilidad de evolución tecnológica sin requerir sustituciones estructurales.	4: Alta compatibilidad técnica con sistemas existentes; responde bien a escenarios normativos cambiantes. 5: Totalmente integrable y adaptable; diseño pensado para interoperabilidad y actualización tecnológica futura.
CATEGORÍA SOCIOCULTURAL		
Aceptación social	Evalúa la percepción y grado de aceptación por parte de la comunidad local hacia la tecnología, considerando aspectos culturales, de salud pública y estéticos.	1: Rechazo generalizado y alta conflictividad social. 2: Baja aceptación; requiere campañas intensivas de sensibilización. 3: Aceptación condicionada; depende del contexto local. 4: Buena aceptación en la mayoría de los entornos urbanos o rurales. 5: Alta aceptación social comprobada; escasos conflictos.
Compatibilidad política	Mide el grado de alineación de la tecnología con las políticas públicas locales, regionales o nacionales en materia ambiental, energética o de residuos.	1: Incompatible con la normativa o con políticas estratégicas actuales. 2: Escasa compatibilidad; requiere modificaciones normativas. 3: Compatible en parte; se adapta con medidas de acompañamiento. 4: Alineada con políticas públicas existentes. 5: Totalmente coherente con las estrategias institucionales vigentes.
Facilidad de emplazamiento	Considera la viabilidad socioterritorial para localizar nuevas instalaciones: aceptación vecinal, disponibilidad de suelo, conflictos de uso, etc.	1: Alta conflictividad territorial y dificultades legales/urbanísticas. 2: Dificultades frecuentes para su ubicación. 3: Condiciones moderadas; requiere negociación y estudio de ubicación. 4: Viable en distintos entornos con restricciones menores. 5: Fácil de emplazar; mínimas restricciones sociales o legales.

Generación de empleo	Evalúa el potencial de la tecnología para generar empleo directo e indirecto a nivel local, en fases de construcción, operación y mantenimiento.	1: Genera muy poco empleo; operación automatizada o centralizada. 2: Bajo impacto laboral. 3: Generación moderada de empleo en operación. 4: Buena capacidad de empleo local durante operación y mantenimiento. 5: Alto impacto en empleo local, incluyendo economía circular y sectores conexos.				
Vulnerabilidad ante molestias	Mide el riesgo de generar molestias o impactos sociales (olores, ruido, tráfico, etc.) en zonas habitadas cercanas y su percepción negativa.	1: Alta vulnerabilidad; molestias frecuentes y difícil mitigación. 2: Molestias significativas; requiere medidas técnicas estrictas. 3: Riesgo moderado; control posible con buenas prácticas. 4: Baja probabilidad de molestias; mitigación sencilla. 5: Mínimo impacto perceptible para la población cercana.				
CATEGORÍA ECONÓMICA						
Coste de construcción	Evalúa la inversión inicial requerida para la instalación de la tecnología, incluyendo adquisición de equipos, obras civiles, integración en infraestructuras existentes, etc.	COSTE DE CONSTRUCCIÓN (€/t/año de capacidad instalada)				
		1 = Muy Elevado	2 = Elevado	3=Moderado	4 = Bajo	5 = Muy bajo
		> 5.000	3.000–5.000	2.000–3.000	1.000–2.000	< 1.000
Coste de operación y mantenimiento	Considera los costes recurrentes anuales asociados al funcionamiento del sistema: energía, reactivos, personal, mantenimiento, gestión de residuos secundarios, etc.	COSTE DE OPERACIÓN (€/t tratada)				
		1 = Muy alto	2 = Alto	3 = Medio	4 = Bajo	5 =Muy bajo
		> 150	100 - 150	60 - 100	30 - 60	< 30

Rentabilidad económica	Evalúa el retorno económico de la inversión a través de ingresos potenciales (valorización de productos, energía, recuperación de materiales, etc.).	1: No genera ingresos; únicamente costes. 2: Genera ingresos muy limitados o inestables. 3: Ingresos moderados; cubre parcialmente los costes de operación y mantenimiento. 4: Buena rentabilidad; reduce costes netos significativamente. 5: Alta rentabilidad; potencial generación de beneficios.
Viabilidad financiera a largo plazo	Mide la sostenibilidad económica del sistema en un horizonte de más de 10 años, considerando costes, ingresos, subvenciones posibles y dependencia tecnológica.	1: Muy baja; requiere subsidios continuos y presenta alto riesgo económico. 2: Baja; depende de variables inciertas (precio energía, tarifas). 3: Moderada; viable con planificación financiera adecuada. 4: Alta; puede sostenerse con ingresos recurrentes y tarifas. 5: Muy alta; modelo financiero autosostenible y estable.
CATEGORÍA MEDIO AMBIENTAL		
Emisiones contaminantes	Evalúa el nivel de emisiones al aire, agua y suelo generadas por la tecnología, incluyendo gases de efecto invernadero (GEI), contaminantes atmosféricos, efluentes líquidos y lixiviados.	1: Muy altas; incluye GEI y contaminantes peligrosos; requiere sistemas complejos de control. 2: Altas; necesita medidas de mitigación avanzadas. 3: Moderadas; emisiones controlables con tecnología estándar. 4: Bajas; emisiones reducidas y bajo impacto ambiental. 5: Muy bajas o nulas; sistema cerrado o con captura integrada.
Riesgo biológico (patógenos)	Considera la capacidad del sistema para inactivar o controlar la proliferación de patógenos y otros riesgos biológicos (especialmente en fracciones orgánicas).	1: Alto riesgo de proliferación de patógenos; sin tratamientos higienizantes. 2: Riesgo significativo; requiere controles estrictos. 3: Riesgo moderado; depende de condiciones operativas.

		4: Riesgo bajo; incluye procesos de higienización efectivos. 5: Riesgo mínimo; eliminación eficaz de patógenos validada.				
Ocupación del suelo	Evalúa la superficie requerida para la implementación de la tecnología, considerando instalaciones, áreas de acopio, accesos y zonas auxiliares.	OCUPACIÓN DE SUELO (m² por tonelada/año de capacidad)				
		1 = Muy alta	2 = Alta	3=Moderada	4 = Baja	5 =Muy baja
		> 10	6 – 10	3 – 6	1 – 3	< 1
Recuperación/eliminación de residuos	Mide la eficiencia del sistema para valorizar materiales (orgánicos, reciclables, energía) frente a la eliminación (vertido, incineración sin recuperación).	EFICIENCIA DE VALORIZACIÓN (% valorizado)				
		1 = No recupera	2 = Baja recuperación	3=Moderada	4 = Alta recuperación	5 =Muy alta recuperación
		< 10	10 – 30	30 – 60	60 – 85	> 85

Los valores incluidos en estas tablas reflejan los resultados del trabajo de campo, las consultas a informes oficiales y los análisis técnicos descritos anteriormente. Cada puntuación ha sido justificada mediante referencias a normativa vigente, bases de datos oficiales, literatura científica y estudios de proyectos de licitación accesibles públicamente. De esta forma, se respalda la objetividad y replicabilidad del procedimiento: cualquier tercero podrá verificar la procedencia de los datos y reproducir las mediciones en contextos similares.

Esta definición detallada de criterios y subcriterios, junto con su método de medición, constituye la base sólida para el análisis multicriterio. Las tablas resultantes, que a continuación se presentan, servirán como punto de partida para la posterior normalización, ponderación y cálculo de proximidades relativas mediante el método TOPSIS, garantizando un proceso de decisión transparente, reproducible y ajustado a las exigencias de la planificación de infraestructuras de gestión de RSU.

3.5. Determinación de pesos

En cualquier análisis multicriterio, el peso asignado a cada criterio representa su importancia relativa en la toma de decisiones. La asignación de estos pesos tiene un impacto directo sobre la clasificación final de las alternativas, por lo que su determinación debe ser rigurosa, coherente y lo menos sesgada posible.

En un primer nivel de análisis, se establece un escenario inicial en el que todos los criterios y subcriterios reciben el mismo peso. Esta opción permite observar los resultados bajo condiciones de equidad absoluta entre factores, sirviendo como punto de referencia para posteriores ajustes y comprobaciones.

No obstante, esta aproximación carece de realismo técnico, ya que en la práctica no todos los criterios tienen la misma influencia en la idoneidad de una alternativa. Para mejorar la robustez del análisis y minimizar la subjetividad del decisor, se descarta el uso de métodos como el **Proceso Analítico Jerárquico** (AHP), en los que la ponderación se basa en comparaciones de preferencia entre pares. Este tipo de enfoque introduce un componente subjetivo que puede distorsionar los resultados dependiendo del perfil y percepción del evaluador.

Con el objetivo de asegurar un tratamiento objetivo y replicable de los pesos, se emplea el **método Montecarlo**, basado en simulaciones a partir de distribuciones de probabilidad. Este enfoque permite generar un conjunto de posibles distribuciones de pesos siguiendo una función de probabilidad definida (por ejemplo, distribuciones uniformes o triangulares), y evaluar múltiples escenarios mediante iteraciones aleatorias. De este modo, se obtienen múltiples escenarios que representan cualquier combinación de pesos. Esto permite identificar la probabilidad de que una alternativa sea escogida en base a todos estos escenarios. Entre las principales **ventajas del enfoque Montecarlo** destacan:

- Reducción de la subjetividad del analista.
- Posibilidad de evaluar la robustez de las soluciones frente a la incertidumbre.
- Identificación de criterios con mayor influencia sobre el resultado final.

Al igual que en la elección del método de análisis, la selección del procedimiento de ponderación de los distintos criterios debe estar debidamente fundamentada. Como punto de partida, se recomienda emplear la metodología de simulación Montecarlo para determinar la alternativa con mayor probabilidad a ser elegida, dado que aporta mayor solidez al análisis multicriterio. Este enfoque proporciona una base estadística objetiva para la comparación entre alternativas y contribuye a una toma de decisiones más fundamentada, reduciendo la influencia de posibles sesgos individuales. Además, permite identificar con precisión qué resultados son robustos y cuáles son sensibles a variaciones en las ponderaciones, lo que incrementa la fiabilidad global del proceso decisional.

Para finalizar, este apartado de la propuesta metodológica presenta de forma estructurada los resultados finales del análisis, conforme al siguiente esquema:

En primer lugar, se debe presentar la matriz TOPSIS correspondiente al caso base, en el que todos los criterios se ponderan de forma equitativa. Esta matriz servirá como escenario de referencia para observar los resultados iniciales sin sesgo en la asignación de importancia relativa.

Seguidamente, se mostrarán los resultados obtenidos tras aplicar el modelo Montecarlo, identificando cuáles son las alternativas óptimas tanto en términos de localización como de tecnología, considerando múltiples combinaciones de pesos a partir de simulaciones aleatorias.

Por último, se incorporará el análisis de sensibilidad que permitirá evaluar el grado de influencia de cada subcriterio sobre la clasificación final de las alternativas. Esta fase resulta fundamental para determinar la robustez de las soluciones propuestas y para comprender cuáles son los factores clave que condicionan la toma de decisiones en escenarios de gestión de residuos sólidos urbanos.

3.6. Formulación de conclusiones.

La última etapa de la propuesta metodológica consiste en interpretar los resultados obtenidos del análisis multicriterio, con el objetivo de establecer conclusiones claras y justificadas que faciliten la toma de decisiones. Esta fase no solo resume los hallazgos del modelo, sino que también permite reflexionar críticamente sobre su significado y aplicabilidad.

Para garantizar la trazabilidad del proceso, los resultados deben presentarse de forma transparente, manteniendo la coherencia con los valores introducidos y las hipótesis adoptadas. La conclusión no debe limitarse a señalar la alternativa con mejor puntuación, sino que debe explicar el porqué de su posicionamiento y evaluar las consecuencias prácticas de dicha elección.

En primer lugar, se analizan los resultados obtenidos bajo la configuración base (misma ponderación para todos los criterios), lo que permite observar un escenario neutro. Posteriormente, se incorporan los resultados derivados del análisis de sensibilidad mediante Montecarlo, en los que las ponderaciones se distribuyen aleatoriamente para generar un abanico amplio de posibles escenarios.

Al comparar ambos enfoques, se evalúa si el ranking de alternativas se mantiene estable o si, por el contrario, se producen cambios significativos. Cuando los resultados se mantienen constantes, se puede concluir que el modelo es robusto y que la alternativa mejor valorada no depende de la ponderación específica asignada. En cambio, si las posiciones se alteran sustancialmente, debe realizarse un análisis más detallado para identificar los criterios que han motivado esa variación y replantear, en su caso, el enfoque de priorización.

La formulación de conclusiones debe integrar tanto la interpretación técnica de los resultados como su viabilidad práctica. La comparación entre el escenario base y el análisis de sensibilidad permite validar la solidez del modelo propuesto, identificar los factores más determinantes en la decisión y establecer recomendaciones finales sustentadas en evidencias cuantificadas. Esta última fase consolida la utilidad del enfoque multicriterio aplicado, alineando el proceso metodológico con los principios de objetividad, transparencia y toma de decisiones informada.

3.7. Conclusión.

La gestión integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituye un problema de decisión de elevada complejidad, al implicar la evaluación simultánea de múltiples alternativas, tanto de localización como tecnológicas, y una amplia variedad de criterios heterogéneos, que abarcan dimensiones técnicas, económicas, ambientales y socioculturales. La diversidad de unidades de medida y la posible existencia de conflictos entre objetivos hacen inviable una elección directa basada en la optimización de un único parámetro o en apreciaciones subjetivas.

Frente a esta complejidad, la aplicación de un enfoque multicriterio, tomando como punto de partida el método TOPSIS, permite abordar la problemática de forma estructurada y objetiva. A través de la normalización de los subcriterios, se garantiza una comparación equitativa entre alternativas, mientras que la ponderación de criterios permite reflejar su relevancia relativa en el proceso decisonal. Inicialmente se parte de un escenario base con pesos uniformes; no obstante, para evitar la subjetividad asociada a métodos basados en juicios de experto, se propone la aplicación del análisis de Montecarlo. Esta técnica de simulación estadística permite generar distribuciones aleatorias de pesos, analizar la sensibilidad de los resultados y reforzar la validez y replicabilidad del modelo.

Esta propuesta metodológica proporciona, por tanto, una herramienta técnica eficaz para la selección de alternativas óptimas en escenarios complejos. A lo largo del proceso se asegura la trazabilidad de los datos, la transparencia en las decisiones y la posibilidad de validar la robustez de los resultados mediante análisis de sensibilidad.

En definitiva, se establece una metodología clara, replicable y adaptada a las exigencias actuales en materia de planificación de infraestructuras ambientales. Su aplicación permite fundamentar las decisiones en criterios verificables y en evaluaciones equilibradas, contribuyendo a una gestión más eficiente, transparente y sostenible de los residuos sólidos urbanos.

4. CASO PRÁCTICO

4.1. Introducción

Este apartado tiene como objetivo aplicar la propuesta metodológica desarrollada previamente con el fin de determinar, de manera objetiva y justificada, la localización óptima y la tecnología más adecuada para las instalaciones de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU). Para ello, se ha seleccionado el ámbito del Plan Zonal de la Vega Baja (PZ 11 – AGA6), en la provincia de Alicante, debido a su complejidad territorial, su elevada generación de residuos y su prolongada carencia de infraestructuras propias.

En primer lugar, se describe el estado actual del plan zonal, identificando los principales factores que han dificultado históricamente la gestión de residuos en esta comarca. A partir de este diagnóstico, se definen los condicionantes técnicos, normativos, sociales y económicos que estructuran el análisis. Seguidamente, se procede a la identificación de las alternativas de ubicación y tecnología disponibles, así como a la formulación de los criterios y subcriterios necesarios para su evaluación.

Posteriormente, se aplica el método multicriterio TOPSIS sobre las alternativas seleccionadas, permitiendo establecer un ranking de preferencia fundamentado en el cumplimiento de los distintos requisitos establecidos. Además, se incorpora un análisis de sensibilidad para validar la robustez de los resultados obtenidos frente a variaciones en la ponderación de los criterios.

Finalmente, se presentan las conclusiones del caso práctico, destacando tanto la viabilidad de la alternativa seleccionada como las implicaciones prácticas de la aplicación de esta metodología en contextos reales de planificación de infraestructuras de gestión de residuos.

4.2. Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ 11 – A6)

Según el PIRCV, los planes zonales (PZ) son instrumentos para desarrollar y perfeccionar dicho plan, permitiendo modificar, cuando corresponda, aquellas previsiones no vinculantes. Estos documentos detallados se orientan a la distribución de las infraestructuras necesarias para asegurar una gestión adecuada de residuos en cada territorio, en línea con los principios de autosuficiencia y proximidad. El principio de autosuficiencia denota la capacidad de una región para gestionar y tratar sus residuos de manera independiente, mientras que el de proximidad promueve el tratamiento en las instalaciones más cercanas y adecuadas. Ambos principios se complementan para favorecer una gestión local, eficiente y sostenible. No obstante, en el caso específico del Plan Zonal de la Vega Baja, estos principios no se aplican de manera adecuada, lo que plantea desafíos en la gestión eficiente y sostenible de los residuos en la zona.

A continuación, se presenta la ubicación del Plan Zonal objeto de estudio dentro del territorio de la Comunidad Valenciana, según las delimitaciones y nomenclaturas actuales establecidas en el PIRCV.

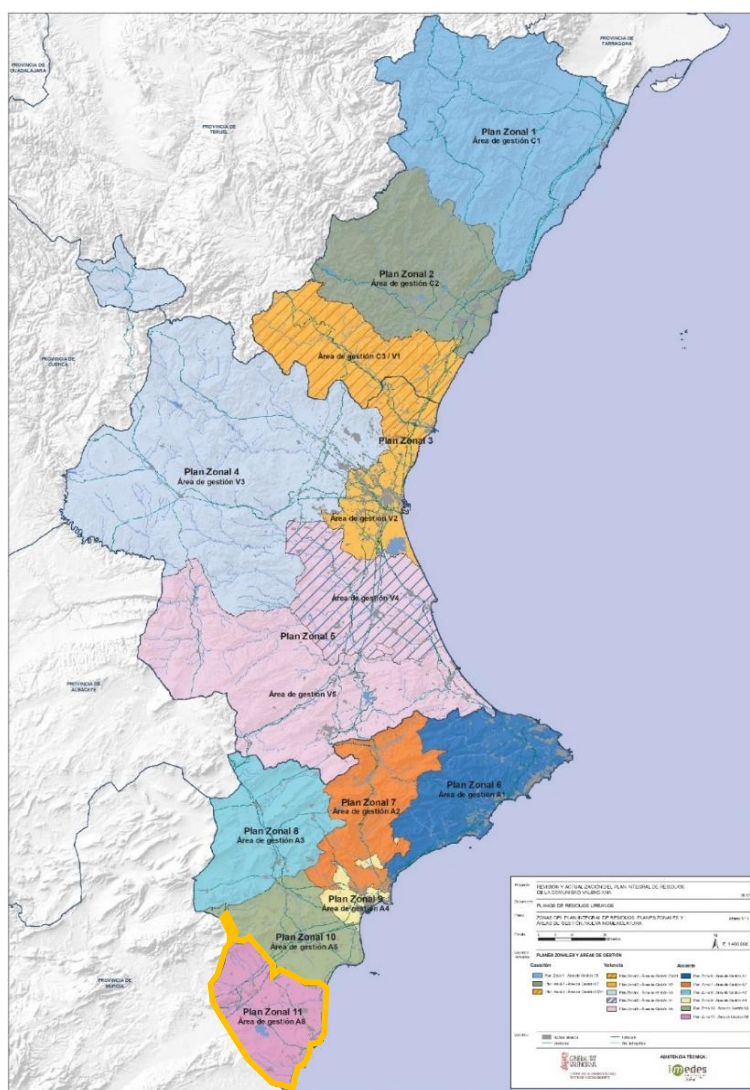


Figura 27. Planes Zonales de la Comunidad Valenciana. Fuente: PIRCV 2013

4.2.1. Estado actual

Para evaluar la magnitud de la problemática comentada anteriormente, a continuación, se presenta una tabla que refleja la producción de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y la población correspondiente al año 2023. Es importante señalar que los acrónimos **FORS (t)** y **RUM (t)** hacen referencia a las toneladas de residuos orgánicos y reciclables, y a las toneladas de residuos urbanos municipales, respectivamente.

Tabla 11. Población, superficie y RSU de los 27 municipios de la Vega Baja. Fuente: elaboración propia.

MUNICIPIO	SUPERFICIE (km ²)	POBLACIÓN (2023)	FORS (t)	RUM (t)
Albatera	66	12.864	0	4.348,92
Algorfa	18	3.513	0	1.783,86
Almoradí	43	21.401	0	8.174,88
Benejúzar	9	5.480	0	2.112,19
Benferri	12	1.955	0	887,02
Benijófar	4	3.427	0	1.796,67
Bigastro	4	7.130	0	2.422,53
Callosa del Segura	25	19.315	0	7.326,86
Catral	20	8.976	0	3.976,36
Cox	17	7.431	0	4.075,88
Daya Nueva	7	1.758	0	828,11
Daya Vieja	3	683	0	296,89
Dolores	19	7.799	0	2.935,77
Formentera del Segura	4	4.446	0	2.036,21
Granja de Rocamora	7	2.626	0	1.164,05
Guardamar del Segura	36	16.138	0	9.602,58
Jacarilla	12	2.039	0	887,13
Montesinos (Los)	15	5.217	0	2.277,79
Orihuela	370	80.784	0	44.647,32
Pilar de la Horadada	73	22.949	0	13.376,92
Rafal	2	4.436	0	1.666,44
Redován	9	8.123	0	3.278,28
Rojales	27	16.943	10,58	8.939,99
San Fulgencio	19	9.091	0	4.811,00
San Isidro	7	2.154	0	1.420,40
San Miguel de Salinas	55	6.659	0	3.073,14
Torrevecija	71	83.547	19,80	48.936,51

Con una población total de 367.082 habitantes en la comarca de la Vega Baja, algunas de las características más destacadas de este Plan Zonal son las siguientes:

1. Es un Plan Zonal de la Comunidad Valenciana que carece de las instalaciones necesarias para el tratamiento y la eliminación de los residuos generados. Como consecuencia, los 27 municipios que lo integran deben exportar sus residuos, lo que se traduce en un elevado coste económico y medioambiental.
2. En lo que respecta a la distribución espacial de la comarca del PZ 11, la mayor parte de los núcleos de población se localizan en la mitad norte, si bien existen algunas excepciones, como Pilar de la Horadada.
3. Con un total de 954 km² de superficie, la logística de la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es fundamental en este Plan Zonal. Debido a sus dimensiones, los principales núcleos de población, como Orihuela y Torrevieja, se encuentran a una distancia considerable de aproximadamente 35 km entre sí.



Figura 28. Mapa de la Vega Baja, comarca del PZ11 – AGA6. Fuente: Diario de la Vega.

Esta situación de precariedad en el ámbito de la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) refleja diversos factores que se han ido sucediendo a lo largo de las últimas décadas. En consecuencia, surge una urgente necesidad de garantizar el cumplimiento de los principios de autosuficiencia y proximidad en el Plan Zonal objeto de estudio. Para ello, es indispensable desarrollar una propuesta metodológica que proporcione una herramienta de análisis capaz de llevar a cabo un estudio comparativo y objetivo de las distintas alternativas respecto a la localización de las instalaciones necesarias en la Vega Baja.

Seguidamente, se nombran los factores que han dificultado y dificultan la gestión de RSU en el PZ 11 - A6:

- **Infraestructura insuficiente:** La comarca de la Vega Baja carece de una red propia de plantas de tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos capaz de absorber el volumen generado por sus 27 municipios. Hasta 2022, únicamente disponía de una planta de transferencia en Dolores, diseñada para aliviar la presión sobre instalaciones externas en Elche, Villena y Xixona. Sin embargo, este recurso resulta claramente insuficiente: la totalidad de los RSU debe transportarse fuera del PZ 11 – A6, lo que incrementa notablemente los costes operativos y las emisiones asociadas al traslado. Diversos medios han destacado la saturación de los vertederos receptores, por ejemplo, en noviembre de 2024 la planta de Xixona gestionó 10.400 t, incluidas 8.200 t procedentes de las inundaciones de la DANA, lo que evidencia la urgencia de disponer de un equipamiento local que permita una gestión más eficiente y sostenible del flujo de residuos.
- **Reticencia política y social:** La ausencia de un consenso político y ciudadano en torno a la necesidad de dotar a la comarca de infraestructuras propias de tratamiento de RSU ha retrasado de forma reiterada la aprobación y ejecución de proyectos comarcales. Esta falta de acuerdo intermunicipal se traduce en decisiones fragmentadas, con cada ayuntamiento actuando de manera autónoma, y refuerza la resistencia local a la instalación de plantas de tratamiento cercanas (“efecto NIMBY”).

Desde 2007, los medios de comunicación han venido informando sobre distintas ubicaciones propuestas, la primera en Torremendo (Orihuela), finalmente descartada tras las alegaciones de vecinos alarmados por posibles impactos ambientales, así como sobre el prolongado litigio judicial que ha pospuesto cualquier avance decisivo. A pesar de las continuas negociaciones entre la Generalitat, la Diputación y los ayuntamientos implicados, únicamente se ha materializado la planta de transferencia de Dolores y se ha incorporado el análisis de la incineración como opción de valorización energética.

En respuesta a la persistente oposición, el Ayuntamiento de Orihuela ha propuesto recientemente una parcela de 200 000 m² entre Jacarilla y Bigastro, seleccionada tras evaluar criterios ambientales, geológicos, de accesibilidad y transporte. Sin embargo, la viabilidad definitiva de este emplazamiento queda supeditada a los informes técnicos del Consorcio y de la Generalitat, así como a la aceptación de la comunidad local.

- **Problemas económicos, financieros y de transparencia:** Las limitaciones presupuestarias de los municipios han dificultado la inversión en infraestructuras y tecnologías avanzadas para el

tratamiento de residuos, comprometiendo el cumplimiento de los objetivos establecidos por el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV). La elevada carga de costes operativos y de capital ha reducido la capacidad de los ayuntamientos para desplegar soluciones integrales y eficientes. Por otro lado, los déficits en transparencia en los procesos de contratación pública han favorecido prácticas irregulares desde principios de siglo. Ello no sólo dañó la imagen de las instituciones locales, sino que también ralentizó la implementación de mejoras en la gestión de residuos al generar desconfianza y complejidad en los procedimientos de licitación.

- **Evolución normativa y enfoques técnicos:** A lo largo de las sucesivas revisiones del Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV), las decisiones técnicas han ido adaptándose a los requerimientos legales y a las prioridades medioambientales. En ediciones precedentes, la incineración figuraba como una posibilidad teórica, pero quedó descartada por la controversia sobre sus impactos y la oposición de colectivos ecologistas. Sin embargo, la Directiva Europea 2018/851, que restringe al 10 % el vertido a vertedero desde 2035, ha reavivado el interés por las tecnologías térmicas como vía para reducir drásticamente los volúmenes enviados a vertedero mediante valorización energética.

Además, tras la DANA de octubre de 2024 y el consecuente aumento puntual de los RSU, la Generalitat ha propuesto medidas de carácter urgente, como la creación de vertederos temporales y la instalación de tres incineradoras, una por provincia, ubicadas en polígonos industriales para maximizar la captación de energía generada. Cada planta requeriría una inversión aproximada de 300 M€. Aunque la propuesta fue rechazada por el gobierno anterior, la administración actual la valora como un instrumento para reforzar la resiliencia comarcal y alinearse con los objetivos europeos de reducción de vertido y autosuficiencia energética.

El análisis detallado del contexto actual del Plan Zonal PZ11 – AGA6 pone de manifiesto una situación estructuralmente deficitaria en la gestión de los residuos sólidos urbanos en la comarca de la Vega Baja. La inexistencia de instalaciones propias de tratamiento y eliminación, unida a la fragmentación política, la oposición social y la falta de planificación financiera sostenible, ha impedido el cumplimiento de los principios de proximidad y autosuficiencia establecidos en la normativa vigente. A estos factores se suman antecedentes de opacidad en la contratación pública y una evolución normativa que, aunque progresiva, no ha logrado todavía materializar soluciones operativas a escala comarcal. Todo ello ha derivado en una excesiva dependencia de instalaciones externas, elevados costes económicos y ambientales, y una pérdida de eficacia en el modelo de gestión.

Este diagnóstico evidencia la necesidad urgente de disponer de una herramienta metodológica robusta que permita tomar decisiones informadas, transparentes y consensuadas sobre la ubicación y tecnología más adecuada para las futuras infraestructuras de valorización y eliminación de RSU. El diseño de una estrategia objetiva, basada en criterios técnicos, sociales, económicos y medioambientales, resulta esencial para revertir esta situación de vulnerabilidad estructural y avanzar hacia un modelo de gestión integrado, resiliente y sostenible en el marco del Plan Zonal PZ11 – AGA6.

4.3. Hipótesis y condicionantes

Como ya se ha comentado, el objetivo principal del presente estudio es identificar la alternativa más adecuada para la localización y selección tecnológica de las instalaciones de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) en el ámbito del Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6). Para ello, se consideran de forma integral los condicionantes técnicos, normativos, sociales, económicos y medioambientales que definen el marco de decisión, articulando así una metodología basada en la realidad concreta del territorio.

1. Condicionantes normativos de localización

La normativa nacional y regional, especialmente el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV), establece tres ejes fundamentales que condicionan la selección de ubicaciones viables:

- Proximidad a núcleos urbanos e industriales.

Se establece una separación mínima de 500 metros respecto a áreas urbanas o industriales y una recomendación de al menos 2.000 metros al núcleo poblacional principal, con el fin de minimizar impactos negativos relacionados con el tráfico, el ruido, los olores y garantizar la protección de la salud pública.

- Zonas de riesgo geológico e hidrogeológico.

Se descarta cualquier emplazamiento ubicado en zonas de riesgo, como terrenos aluviales, zonas húmedas, áreas con fallas geológicas o de elevada actividad sísmica, con el objetivo de evitar filtraciones de lixiviados, inestabilidad estructural y posibles afecciones ambientales.

- Compatibilidad urbanística y uso del suelo.

La planificación debe garantizar que, tras el cierre de la instalación, el suelo pueda integrarse en usos futuros compatibles con su entorno, sin afectar zonas de valor cultural, ecológico o urbanístico.

2. Hipótesis territoriales y funcionales

En base a la situación actual del PZ11 – AGA6, se plantean las siguientes hipótesis específicas:

- Se parte de la situación actual del Plan Zonal, donde únicamente se encuentra la existencia de una planta de transferencia (Dolores), por lo que solo se considerarán emplazamientos lo más cercanos a esta infraestructura y/o con conexión directa a la red viaria principal.
- No se asumirá homogeneidad en la capacidad de gestión entre ubicaciones, reconociendo que cada emplazamiento tiene características físicas distintas (superficie, pendiente, permeabilidad), lo que introduce condiciones iniciales heterogéneas entre alternativas.
- Se descarta el vertido en depósito controlado, como alternativa 0, al no implicar el uso de tecnología y no alinearse con los objetivos normativos de la Unión Europea y las directrices del PIRCV en materia de economía circular y reducción del uso de vertedero al 10 % en 2035.

- Se establece que las instalaciones de valorización y eliminación (vertedero) se ubiquen en un mismo emplazamiento, con el fin de minimizar las distancias de transporte y los costes logísticos asociados a la planificación integral de la gestión de residuos en el Plan Zonal PZ11 – AGA6.

3. Condicionantes sociales y políticos

La experiencia reciente del plan zonal ha puesto de manifiesto las dificultades derivadas de la falta de consenso político entre municipios, la resistencia social a la instalación de infraestructuras (fenómeno NIMBY) y la ausencia de procesos sólidos de participación ciudadana. Por ello, se incorpora como condicionante clave la necesidad de seleccionar ubicaciones con menor grado de conflictividad social y aumentar la transparencia para mejorar la aceptación pública del proyecto.

4. Condicionantes técnicos y evolución normativa

En cuanto al enfoque tecnológico, se consideran exclusivamente aquellas soluciones que cumplan con el principio de Mejores Técnicas Disponibles (MTD), recogido en la Directiva 2010/75/UE, lo que asegura su viabilidad técnica y ambiental.

Las MTD se definen como las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel de protección del medio ambiente, teniendo en cuenta no solo la tecnología empleada, sino también el modo en que la instalación se diseña, explota y mantiene. Además, deben estar disponibles a una escala que permita su aplicación práctica en condiciones técnica y económicamente viables.

La alternativa de vertido en depósito controlado queda descartada en este análisis debido al incremento de las cargas fiscales y a las restricciones normativas crecientes. En cambio, la incineración se incorpora como una opción viable dentro del conjunto de alternativas, en línea con las directrices europeas que limitan el vertido al 10 % en 2035 y como respuesta a la reciente crisis de gestión generada por la DANA de 2024.

5. Condicionantes económicos y de transparencia

Dado el historial reciente de mala gestión y la falta de financiación municipal para infraestructuras, el presente análisis se realiza bajo dos hipótesis:

- Los proyectos deben ser técnicamente viables dentro de presupuestos comarcales ajustados.
- La contratación y ejecución de las instalaciones deberá observar los principios de transparencia, competencia y legalidad, minimizando riesgos asociados a posibles prácticas irregulares.

Estas hipótesis y condicionantes: territoriales, normativos, sociales, técnicos y económicos, constituyen la base sobre la que se aplica la metodología de análisis multicriterio, permitiendo una evaluación rigurosa y reproducible de las alternativas disponibles en el contexto del Plan Zonal PZ11 – AGA.

4.4. Selección del método

En el presente caso de estudio, relativo a la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU), en el Plan Zonal de la Vega Baja, el problema se caracteriza por la existencia de un conjunto finito y claramente definido de alternativas, tanto en lo referente a la ubicación de las instalaciones como a las tecnologías de tratamiento aplicables. Ante esta naturaleza discreta del problema, se ha optado por emplear un método de análisis multicriterio **discreto**, dado que esta categoría de métodos permite trabajar directamente con conjuntos cerrados de opciones sin necesidad de recurrir a modelos matemáticos continuos ni formulaciones complejas.

Esta elección metodológica responde a la necesidad de dar solución a tres elementos clave del problema:

- La presencia de **múltiples alternativas**, que abarcan desde diferentes emplazamientos hasta diversas tecnologías de tratamiento.
- La concurrencia de **múltiples criterios de evaluación**, que incluyen aspectos técnicos, económicos, medioambientales y socioculturales, todos ellos relevantes para una toma de decisiones integral.
- La heterogeneidad de **unidades de medida**, tales como €/t, ha/t, índices o porcentajes, que dificultan la comparación directa entre alternativas.

Para hacer frente a esta complejidad, y entre las distintas técnicas disponibles dentro del enfoque discreto, se ha seleccionado el método **TOPSIS**, cuya idoneidad para este tipo de problemáticas se justifica por su simplicidad conceptual y su robustez técnica.

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), desarrollado por Hwang y Yoon en el año 1981, se clasifica dentro de los métodos de distancia propios del análisis multicriterio discreto. Su elección en la presente propuesta metodológica se justifica por su idoneidad para abordar problemas, como ya se ha comentado, con un conjunto finito de alternativas. Su principal fortaleza radica en su capacidad para establecer un orden de preferencia claro entre las opciones disponibles, evaluando simultáneamente la cercanía de cada alternativa a una solución ideal positiva y su alejamiento respecto a una solución ideal negativa. Todo ello se logra sin recurrir a formulaciones algorítmicas complejas ni a modelos continuos, lo que facilita su aplicación práctica, la comprensión de los resultados obtenidos y su justificación técnica ante diferentes agentes decisores²³.

A continuación, se detallan las etapas que sustentan este método de análisis, el cual se basa en el cálculo de distancias euclídeas para establecer un orden de preferencia entre alternativas:

1. **Construcción de la matriz de decisión.** En primer lugar, se conforma la matriz de decisión $X = [x_{ij}]$, que recoge los valores de cada alternativa A_i frente a los distintos subcriterios C_j . Esta

²³ https://sinbad2.ujaen.es/sites/default/files/publications/pfc_manuelquesada.pdf.

información se obtiene a partir del análisis técnico desarrollado en apartados previos, incluyendo tanto criterios de tipo beneficio (a maximizar) como de coste (a minimizar).

2. **Determinación de las soluciones ideales.** Se identifican las soluciones ideales positiva y negativa para cada subcriterio, en función de su naturaleza (beneficio o coste):

- Solución ideal positiva $A_i^+ = \{max_i x_{ij}\}$ para criterios de beneficio, o $min_i x_{ij}$ para criterios de coste.
- Solución ideal negativa $A_i^- = \{min_i x_{ij}\}$ para criterios de beneficio, o $max_i x_{ij}$ para criterios de coste.

3. **Normalización de la matriz respecto al anti/ideal.** Para evitar que la heterogeneidad de unidades influya en el análisis, se aplica una normalización vectorial a la matriz X , obteniendo las matrices $R^+ = [r_{ij}^+]$ y $R^- = [r_{ij}^-]$. Esta transformación respecto al anti/ideal se realiza según la expresión:

$$r_{ij}^+ = \frac{A_i^+ - x_{ij}}{A_i^+ - A_i^-} \quad r_{ij}^- = \frac{A_i^- - x_{ij}}{A_i^- - A_i^+}$$

De esta forma, todos los valores quedan adimensionalizados y comparables entre sí.

4. **Aplicación de ponderaciones y formación de las matrices ponderadas.** A continuación, se ponderan los valores normalizados mediante los pesos w_j asignados a cada subcriterio, generando para cada matriz normalizada, una matriz ponderada $V^{+/-} = [v_{ij}^{+/-}]$:

$$v_{ij}^+ = w_j \cdot r_{ij}^+ \quad v_{ij}^- = w_j \cdot r_{ij}^-$$

Estos pesos pueden asignarse de forma equitativa (caso base) o mediante simulación estocástica, como en el caso del método de Montecarlo, que será tratado posteriormente.

5. **Cálculo de distancias euclídeas a los ideales.** Para cada alternativa, se calcula la distancia euclídea tanto al ideal positivo como al negativo mediante las siguientes expresiones:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_j (v_{ij}^+)^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_j (v_{ij}^-)^2}$$

6. **Determinación del índice de proximidad relativa.** Finalmente, se calcula el índice de cercanía relativa C_i^* para cada alternativa, que permite establecer un ranking final:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Este coeficiente adopta valores en el intervalo $[0, 1]$. Cuanto más próximo a 1, mayor será la proximidad al ideal positivo y, por tanto, mayor la idoneidad de la alternativa considerada.

En la [Figura 29](#) se muestra el esquema conceptual del método de decisión multicriterio TOPSIS, donde se sintetizan sus fundamentos teóricos y las principales ventajas que lo posicionan como una herramienta especialmente adecuada dentro del conjunto de técnicas de análisis multicriterio discreto.

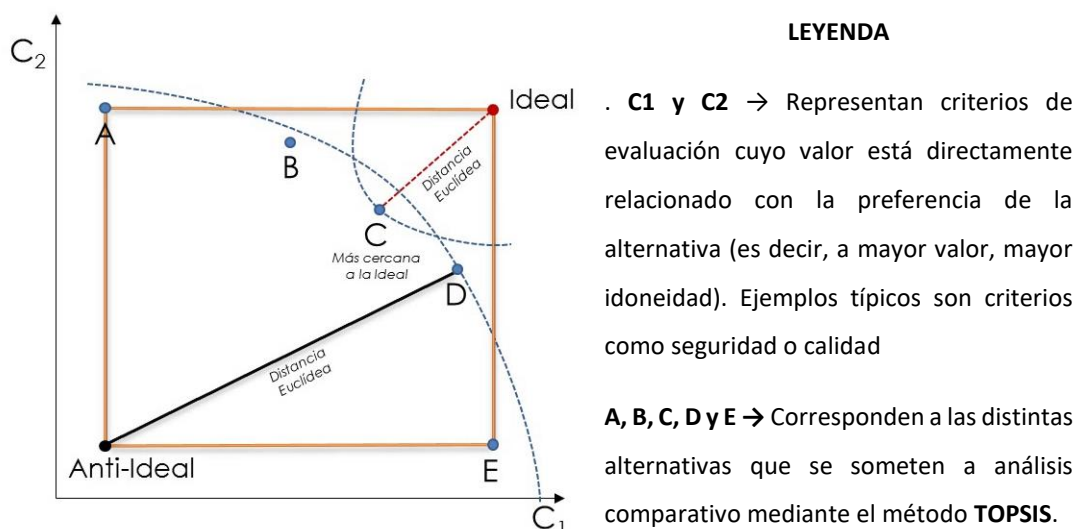


Figura 29. Funcionamiento del análisis TOPSIS. Fuente: [Método de Decisión Multicriterio: TOPSIS](#)

Seguidamente, se analizan en detalle las características que justifican su idoneidad y utilidad en la resolución de este tipo de problemáticas complejas.

En primer lugar, cabe destacar su **simplicidad conceptual** y **claridad operativa**. Su lógica de funcionamiento se basa en un principio intuitivo: seleccionar la alternativa más próxima al ideal positivo (es decir, la mejor puntuación en todos los criterios) y, al mismo tiempo, la más alejada del ideal negativo (la peor puntuación posible). Esta aproximación resulta comprensible incluso para perfiles no técnicos, ya que no requiere conocimientos avanzados de optimización matemática; sus fases: normalización, ponderación, cálculo de distancias euclídeas y generación del índice de preferencia, son fácilmente rastreables y explicable en entornos de decisión colaborativa.

En segundo lugar, TOPSIS ofrece una **gran eficiencia computacional**. Al apoyarse exclusivamente en operaciones matriciales elementales y distancias euclídeas, permite analizar un elevado número de alternativas y criterios sin requerir recursos computacionales significativos. Esta propiedad, junto con su **escalabilidad**, facilita la adaptación del modelo a nuevos escenarios mediante la adición o supresión de criterios o alternativas, sin necesidad de rehacer completamente el análisis.

Otra de sus fortalezas es su **gestión uniforme de criterios heterogéneos**, tanto de beneficio como de coste. A través de una normalización vectorial de las variables, TOPSIS permite integrar en una misma matriz de decisión indicadores expresados en unidades diferentes, sin que ninguno de ellos domine el resultado por su escala. Asimismo, la definición explícita de las soluciones ideales positiva y negativa permite tratar coherentemente los criterios que se desean maximizar y minimizar.

Por último, el método genera un **índice de proximidad relativa** para cada alternativa, comprendido entre 0 y 1, lo que facilita la obtención de un ranking objetivo, transparente y fácilmente interpretable. Este índice, que se basa en las distancias euclídeas a los vectores ideales, se convierte en una herramienta clara

y defendible para seleccionar la mejor opción, además de permitir su visualización mediante representaciones gráficas sencillas y comprensibles por todos los actores implicados.

Seguidamente, se presenta en la [Tabla 12](#), la comparativa donde se sintetizan las ventajas principales del método TOPSIS frente a otras técnicas multicriterio comúnmente utilizadas, como PROMETHEE y AHP:

Tabla 12. Comparación de técnicas multicriterio. Fuente: elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS	TÉCNICAS MULTICRITERIO		
	TOPSIS	PROMETHEE	AHP
Tipo de método	Distancia	Outranking	Comparación por pares
Simplicidad computacional	Alta	Media	Baja (matrices recíprocas)
Interpretabilidad de resultados	Alta	Media	Alta
Manejo de criterios mixtos	Directo	Directo	Requiere escala ordinal
Ranking claro	Sí (coeficiente C_i)	Parcial (relaciones)	Sí (prioridades)

La elección de TOPSIS como método multicriterio discreto responde plenamente a las necesidades del presente análisis, ofreciendo una base metodológica sólida y adaptable para la toma de decisiones complejas en materia de planificación de infraestructuras de gestión de residuos. Para más información, ver el [Anejo ANÁLISIS TOPSIS](#).

4.5. Identificación de alternativas

Conforme a la propuesta metodológica descrita en el capítulo 3, la fase de identificación de alternativas se organiza en dos grupos claramente diferenciados:

Alternativas de localización, en las que se determinará el conjunto de emplazamientos factibles según los criterios normativos, operativos, ambientales y socioculturales establecidos.

Alternativas tecnológicas, en las que se evaluarán las opciones de tratamiento de residuos que cumplan con el principio de Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y los condicionantes económicos, técnicos y medioambientales definidos previamente.

4.5.1. Alternativas de localización

La definición de las ubicaciones posibles se ha visto notablemente facilitada gracias a la documentación técnica disponible en los proyectos presentados a licitación, los cuales han sido impulsados desde el Consorcio Vega Baja Sostenible y otras entidades públicas implicadas. Esta documentación, de carácter oficial y validado, proporciona un punto de partida sólido y contrastable sobre el que aplicar directamente los filtros, hipótesis y condicionantes establecidos en el apartado [4.3 Hipótesis y condicionantes](#).

En la [Figura 30](#) se recogen las distintas ubicaciones propuestas en los proyectos presentados a licitación. A partir de este conjunto inicial, se identifican aquellas alternativas que cumplen con los requisitos mínimos de distancia, accesibilidad, compatibilidad urbanística y la co-localización.



Figura 30. Alternativas iniciales. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se recogen las alternativas viables seleccionadas, las cuales serán analizadas en detalle a continuación.



Figura 31. Alternativas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

Tanto las propuestas de Ecisa-Acciona-Generalal como las de Urbaser-Transric-CHM han sido descartadas por no cumplir con el criterio de co-localización de las instalaciones de valorización y eliminación, establecido como hipótesis inicial del análisis. Por su parte, la propuesta de SAV-Secopsa-Aborgase coincide espacialmente con la de Cespa-Ortiz, lo que reduce el conjunto de alternativas viables a un total de cuatro.

A continuación, se describen estas **cuatro opciones de localización** que conforman el conjunto discreto de alternativas a evaluar. Para cada una de ellas, se presentan las características más relevantes desde el punto de vista del análisis posterior, incluyendo aspectos relacionados con la ubicación, condiciones geotécnicas, geológicas e hidrológicas.

Situado en el Paraje Cocón, en el Polígono 1, parcelas 118, 125, 126, 127 y 130 se encuentran todas las instalaciones.



El núcleo urbano más próximo al emplazamiento propuesto para el complejo de valorización es Albaterra de las Fuentes, situado a una distancia aproximada de 10 kilómetros en dirección noroeste. Esta ubicación

cuenta con una red viaria favorable, destacando su proximidad a la carretera nacional N-340, entre los puntos kilométricos 697+000 y 698+000, y muy cercana a la autovía A-7. Esta configuración viaria permite un acceso eficiente al emplazamiento sin necesidad de atravesar áreas urbanas, lo que contribuye a minimizar las afecciones derivadas del tráfico pesado sobre los núcleos de población. En relación con la planta de transferencia ubicada en el municipio de Dolores, se estima un tiempo de transporte de residuos tratados de aproximadamente 30 minutos.

Desde el punto de vista urbanístico, la parcela está clasificada como suelo no urbanizable común, lo que permite la implantación de instalaciones de utilidad pública e interés social, conforme al Artículo 71 del Título VII de las Normas Subsidiarias de Albaterra.

Además, la baja permeabilidad del suelo representa una ventaja para la contención de lixiviados, mientras que la amplitud del terreno ofrece la posibilidad de futuras ampliaciones mediante la anexión de parcelas adyacentes. No obstante, la presencia de barrancos, como el del Ajuero, y una línea de alta tensión que atraviesa el extremo de la parcela introducen condicionantes geomorfológicos que requieren un estudio detallado para garantizar la estabilidad del terreno y una adecuada planificación de las infraestructuras.



Figura 33. Tendido eléctrico de la Alternativa 1. Fuente: elaboración propia.



Figura 34. Barranco de Ajuero de la Alternativa 1. Fuente: elaboración propia.

Estudio geológico-geotécnico-hidroológico

En el municipio de Albufera afloran materiales pertenecientes al Subbético Externo, concretamente en la terminación occidental del macizo de la Sierra de Crevillente. Este constituye el único dominio de esta unidad geológica que emerge en la provincia de Alicante.

Según el informe del Departamento de Geotecnia del Instituto Técnico de la Construcción S.A., el terreno presenta una topografía abrupta, con una pendiente media del 4 % orientada hacia el sur, y está delimitado al oeste por dos barrancos. El subsuelo se compone de materiales cuaternarios estratificados con granulometría variable, alternando capas arcillosas con otras de carácter granular.

La zona del proyecto está incluida en la Hoja 892 "Fortuna" del Mapa Geológico de España (escala 1:50.000, IGME), donde se identifican afloramientos de margas del Neógeno (Mioceno superior, Tortonense medio), pertenecientes a la serie postorogénica. En la localización prevista para la planta de tratamiento predominan dolomías y carnioles del Triásico, representativas de la serie subbética. En el área designada para el vertedero también se encuentran materiales cuaternarios, como aluviones recientes, conos de deyección y tierras vegetales.

Durante la campaña de sondeos no se detectó la presencia de nivel freático, y la permeabilidad media del terreno se estimó entre 5×10^{-8} y 10^{-9} m/s. Esta baja permeabilidad se debe a la disposición de niveles permeables confinados entre estratos menos permeables.

En cuanto a la hidrología superficial, no existen cauces permanentes en el municipio. La dinámica hídrica está condicionada principalmente por las precipitaciones, la absorción del subsuelo y la estructura del terreno. El emplazamiento se sitúa entre la Rambla Seca Salada y el Barranco de Ajuero, que, junto con otros cauces y la infiltración directa, constituyen la principal fuente de recarga de los acuíferos de la zona, clasificados como de riesgo medio según la cartografía hidrográfica correspondiente.

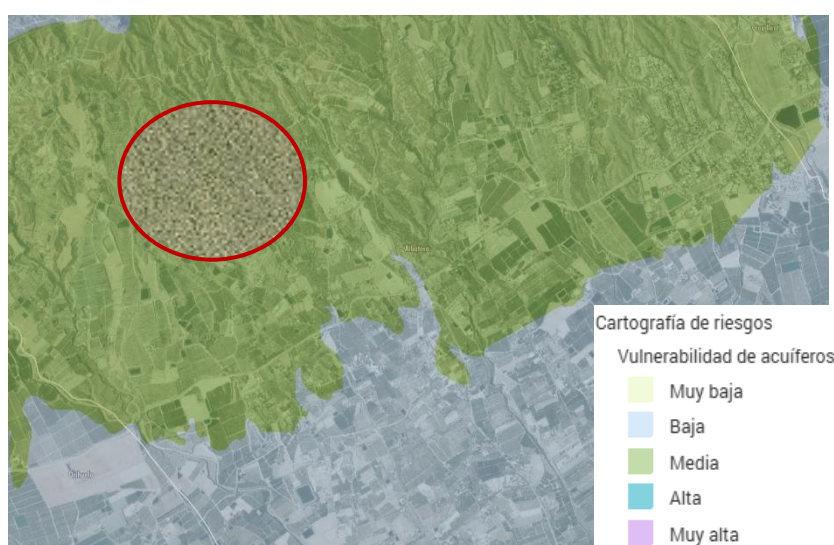


Figura 35. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 1. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

La presencia de escorrentía superficial ha generado procesos erosivos evidentes en el entorno, con formación de cárcavas y encajamiento en la red de drenaje. En términos de estabilidad del terreno, la acumulación de agua en el subsuelo puede provocar un aumento en la deformabilidad del terreno, reduciendo sus propiedades mecánicas y comprometiendo su resistencia. Por otro lado, periodos prolongados de desecación podrían ocasionar una pérdida de cohesión en los materiales, incrementando la susceptibilidad a la inestabilidad geotécnica.

Debido a que la zona está sujeta a fenómenos meteorológicos adversos, como lluvias torrenciales asociadas a episodios de gota fría, lo que puede generar acumulaciones de agua y escorrentías significativas, estos cauces poseen un alto poder erosivo. La Cartografía Temática de la Generalitat Valenciana clasifica el sector noroeste del emplazamiento con una tasa de erosión actual “alta”, mientras que el resto del área presenta una tasa “baja”. De manera similar, el análisis de erosión potencial refleja un patrón coincidente, con un riesgo elevado en la zona noroeste.

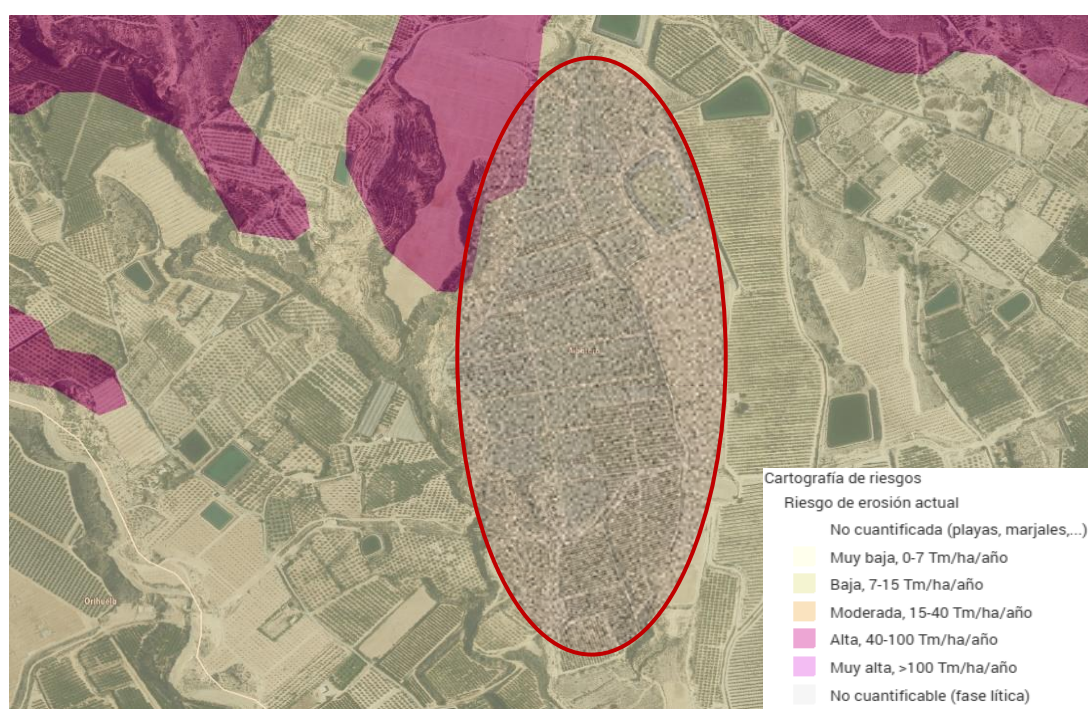


Figura 36. Riesgo de erosión actual y potencial de la Alternativa 1. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

Las características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas del emplazamiento propuesto en Albufera presentan tanto oportunidades como desafíos para la implantación de instalaciones de eliminación y valorización de RSU. Por un lado, la baja permeabilidad y la ausencia de nivel freático son aspectos favorables para la contención de lixiviados. Por otro lado, la topografía abrupta, la presencia de barrancos y la alta erosividad en algunas áreas exigen un diseño técnico riguroso y medidas de estabilización para mitigar riesgos asociados a la deformabilidad y pérdida de cohesión del suelo, especialmente ante eventos meteorológicos extremos.

Se trata de unos terrenos situados al oeste de la pedanía de Torremendo, a tan solo 3 km de esta y aproximadamente a 14 km del núcleo urbano de Orihuela. El emplazamiento se encuentra a la izquierda del embalse de La Pedrera y abarca una superficie aproximada de 500.000 m².



Figura 38. Vista aérea de la Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

La zona dispone de varios accesos viarios que confluyen en la carretera autonómica CV-949, a la que se accede desde la CV-925 (vía que conecta Orihuela con el entorno del embalse) y desde la CV-950 por el este, bordeando la cara norte del embalse. Aunque se trata de una finca alejada de las carreteras principales, cuenta con acceso privado. Desde la planta de transferencia del plan zonal, ubicada en el municipio de Dolores, el tiempo estimado de desplazamiento para el transporte de residuos es de aproximadamente 45 minutos.



Figura 39. Camino de acceso a la Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

El terreno no forma parte de suelo urbano consolidado, lo que le otorga una mayor flexibilidad desde el punto de vista del planeamiento territorial. Además, presenta condiciones favorables para el desarrollo de instalaciones industriales sin interferir con zonas urbanizadas o con valor ambiental sensible. Un aspecto a destacar es que la finca desagua por una vaguada situada por debajo de la cota del embalse de

La Pedrera, por lo que, en caso de producirse un accidente en las instalaciones, no se verían comprometidas las aguas del embalse.

Desde el punto de vista técnico y ambiental, el emplazamiento es potencialmente apto para albergar instalaciones conjuntas de eliminación y valorización de residuos sólidos urbanos. La ubicación cumple con los requisitos de distancia respecto a zonas habitadas, posee un tamaño adecuado y está alejada de espacios de especial protección. Además, su configuración topográfica y geológica reduce significativamente el riesgo de afecciones a cuerpos de agua cercanos.

Estudio geológico-geotécnico-hidroológico

El terreno presenta una topografía suave, caracterizada por formas alomadas y una pendiente media inferior al 5 % en dirección oeste. El sustrato geológico está compuesto por materiales detríticos gruesos en los niveles superiores, sobre los que se disponen potentes series margosas con intercalaciones de calcarenitas y conglomerados calcáreos. No se detectó la presencia de nivel freático en la campaña de sondeos llevada a cabo, y la permeabilidad media del conjunto se sitúa entre 10^{-8} y 10^{-10} m/s, lo que indica un comportamiento muy impermeable.

En cuanto a la erosión, la cartografía temática de la Generalitat Valenciana clasifica el emplazamiento con una tasa de erosión actual “moderada”, rodeado de zonas con tasa “alta”. En términos de riesgo potencial, el conjunto del terreno presenta una clasificación “alta”, con áreas colindantes en el noroeste que alcanzan el nivel de “muy alta”. Esta situación, unida a la presencia de margas cementadas con fracturas visibles en pequeños taludes del límite norte, podría favorecer la aparición de inestabilidades locales en caso de lluvias intensas.

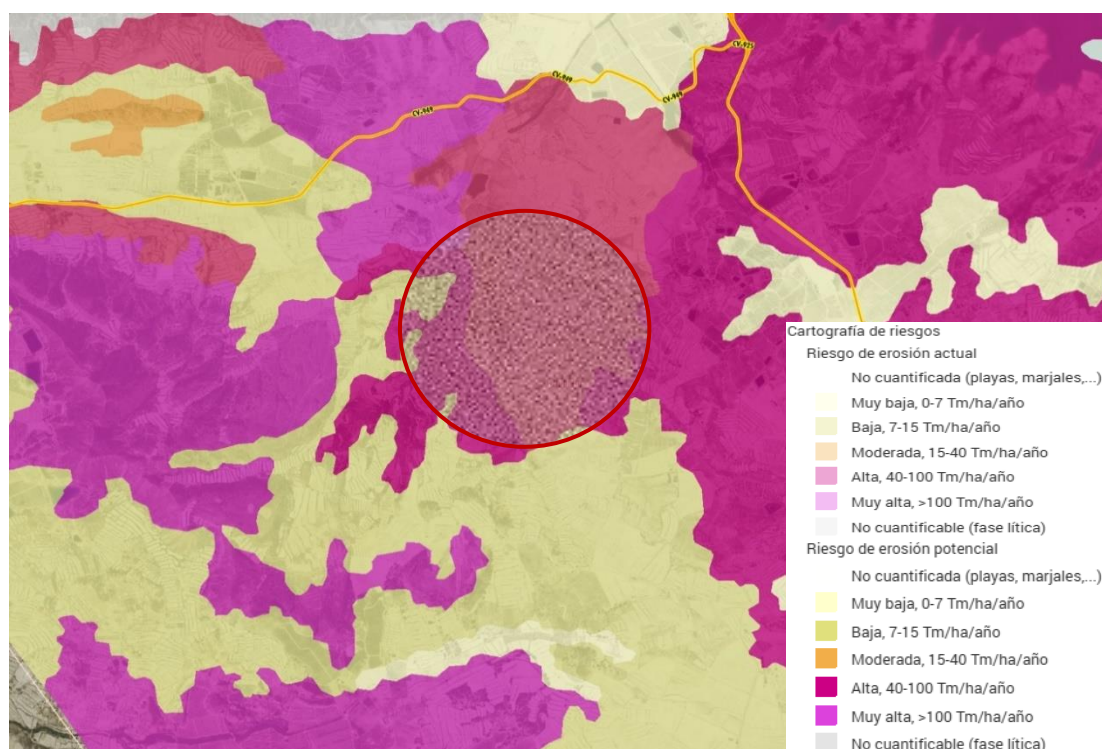


Figura 40. Riesgo de erosión actual y potencial de la Alternativa 2. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

No obstante, la zona objeto del estudio tiene el índice de aridez más elevado de toda la Comunidad Valenciana, presentando un balance hídrico negativo, es decir, las ganancias de agua en forma de precipitación son menores que las pérdidas (escorrentía, infiltración y evapotranspiración) y además, se considera que estos riesgos son gestionables mediante medidas correctoras de carácter técnico.

Fruto de esta climatología, en la que Las precipitaciones son muy exiguas, aleatorias y proporcionadas en un gran porcentaje por chaparrones de elevada intensidad horaria, la zona en la que se pretende instalar la planta no tiene riesgo de inundación.

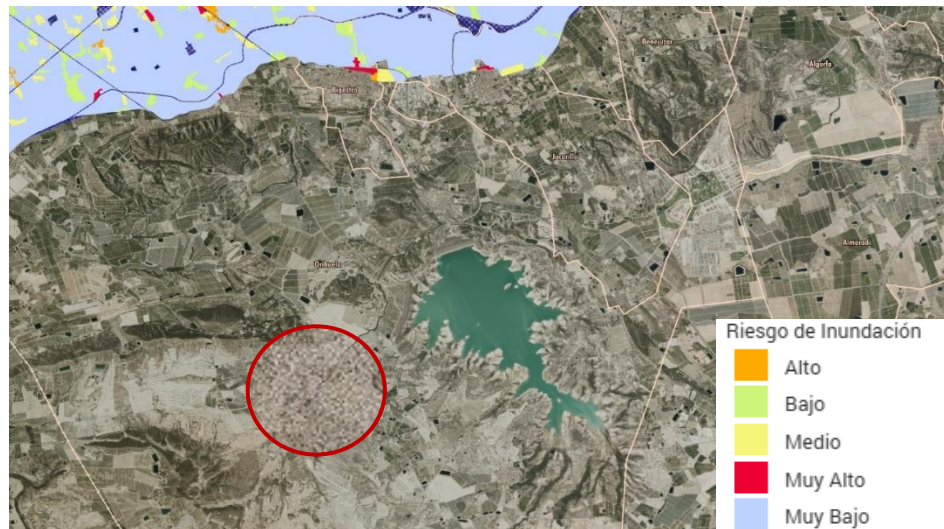


Figura 41. Riesgo de inundación de la Alternativa 2. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

Por último, la vulnerabilidad de los acuíferos en esta localización es baja, lo que refuerza su idoneidad desde la perspectiva hidrogeológica.

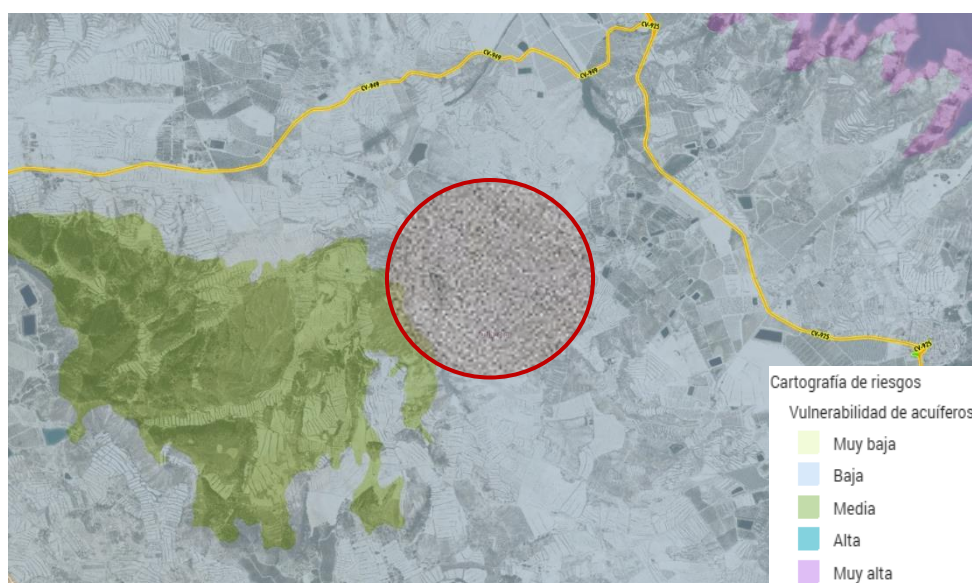


Figura 42. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 2. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

Alternativa 3 (A3) – Orihuela (Las Pistolas)

La parcela de Las Pistolas se sitúa en el término municipal de Orihuela y cabe destacar su forma estrecha, llegando a medir en su parte más angosta 20 metros aproximadamente. A continuación, se presenta una tabla formal que recoge los valores de coordenadas UTM (Huso 30, Datum ED50) que delimitan el sector estudiado.

Tabla 13. Coordenadas UTM del Emplazamiento. Fuente: elaboración propia.

Nº	Valor X	Valor Y	Nº	Valor X	Valor Y	Nº	Valor X	Valor Y
1	680077,1	4209721,0	16	679921,0	4208670,8	31	680384,1	4207822,2
2	680166,6	4209498,9	17	679921,2	4208651,1	32	680474,8	4207832,7
3	680164,3	4209427,7	18	679930,2	4208591,1	33	680506,7	4207836,0
4	680151,4	4209388,4	19	679935,3	4208573,4	34	680585,3	4207835,9
5	680117,3	4209325,5	20	679921,7	4208494,5	35	680585,1	4208240,5
6	680090,6	4209233,0	21	679921,2	4208475,7	36	680386,2	4208190,8
7	680069,4	4209187,4	22	679904,2	4208311,6	37	680316,7	4208439,5
8	680050,1	4209093,0	23	679894,5	4208297,6	38	680286,9	4208437,2
9	680028,9	4209046,0	24	679897,5	4208257,1	39	680265,4	4208432,9
10	680031,4	4209033,4	25	679886,0	4208168,5	40	680248,5	4208439,8
11	680027,8	4209001,7	26	679894,0	4208087,2	41	680217,6	4209091,1
12	680027,2	4208969,0	27	679913,8	4207852,9	42	680275,3	4209485,3
13	679994,1	4208838,7	28	680120,8	4207823,5	43	680123,0	4209737,6
14	679980,2	4208762,2	29	680301,3	4207817,6	44	680101,3	4209734,1
15	679945,3	4208684,2	30	680334,7	4207818,8			

Esta área forma parte del entorno de la Vega Baja y se encuentra en una región de carácter predominantemente agrícola y rural, enmarcada dentro de un paisaje rural transformado por la acción antrópica

El acceso al emplazamiento se efectúa a través de la red vial local, que conecta con las principales vías de comunicación de Orihuela. Aunque la zona se sitúa en un entorno no urbanizado, las carreteras y caminos agrícolas circundantes permiten una conexión fluida con el resto del territorio, facilitando el traslado de maquinaria y la futura operación de las instalaciones. El camino de acceso desde la carretera es la CV-949 y marca el linde de la finca Las Pistolas, quedando ésta en el margen Este, como se observa en la siguiente figura:

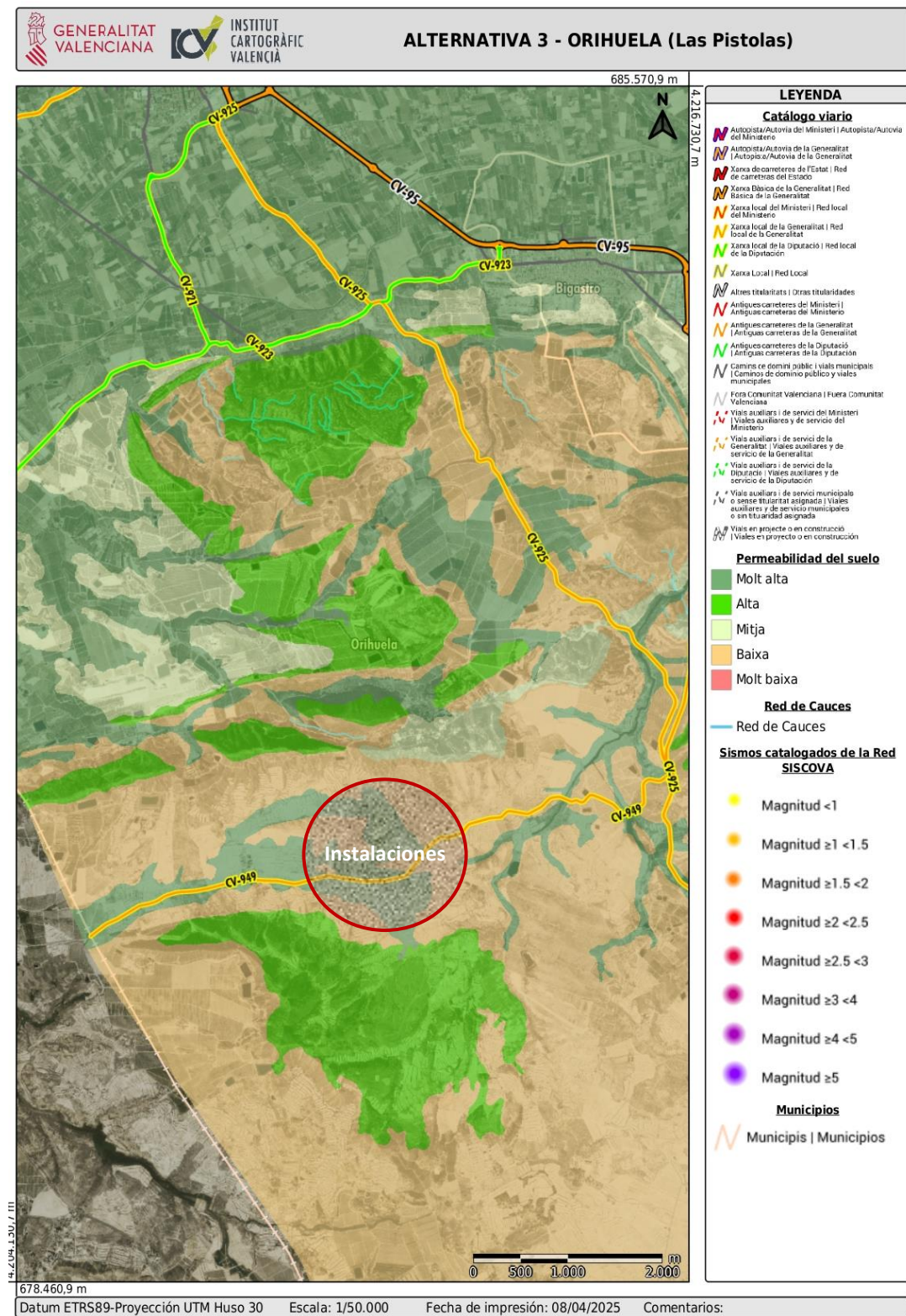


Figura 43. Localización de la Alternativa 3. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)



Figura 44. Orihuela. Paraje Las Pistolas. Fuente: elaboración propia.

El área objeto de estudio se clasifica principalmente como suelo agrícola y forestal, sin presencia de edificación significativa. La región se caracteriza por un paisaje rural, en el que la transformación del terreno ha dado lugar a extensiones dedicadas a cultivos de secano, repoblaciones forestales y áreas sin cultivar. Dada esta tipología, se considera que el emplazamiento no interfiere con el suelo urbano, lo que brinda mayor flexibilidad para la instalación de infraestructuras industriales sin los habituales condicionantes urbanísticos.

La alternativa se presenta como potencialmente apta para albergar conjuntamente las plantas de eliminación y valorización de residuos sólidos urbanos (RSU). La extensa superficie disponible, la baja densidad poblacional y la ausencia de uso urbano consolidado son factores favorables. Además, la ubicación en un entorno rural reduce la posibilidad de conflictos con futuras intervenciones urbanísticas o la interferencia en áreas de alto valor ambiental y cultural. También cabe destacar que el núcleo poblacional más cercano se encuentra a más de 4,5 km de distancia y es el Camping de la Pedrera.

Estudio geológico-geotécnico-hidrológico

El análisis geológico, basado en el Mapa Geológico de España Serie Magna Hoja 913 y en la cartografía geotécnica del IGME, evidencia que la zona está compuesta mayoritariamente por margas (TBc12) y, en una franja limitada al norte, por brechas con distolitos (TBc-B12-2). La morfología del emplazamiento se caracteriza por una topografía mayormente llana con ligeras pendientes, que facilitan la capacidad de carga de la zona a excepción del norte, donde se localiza una franja montañosa caracterizada por elevadas pendientes. Toda la zona está orientada hacia el sur.

Durante la campaña de sondeos, no se detectó la existencia de un nivel freático significativo, lo que refuerza la idoneidad del terreno para fines constructivos. En cuanto a la erosión, la cartografía temática clasifica la tasa de erosión actual como alta en la mayoría del sector, con la erosión potencial llegando a

niveles muy altos en algunas zonas, situación que demanda la implementación de medidas de mitigación en el diseño de la obra.

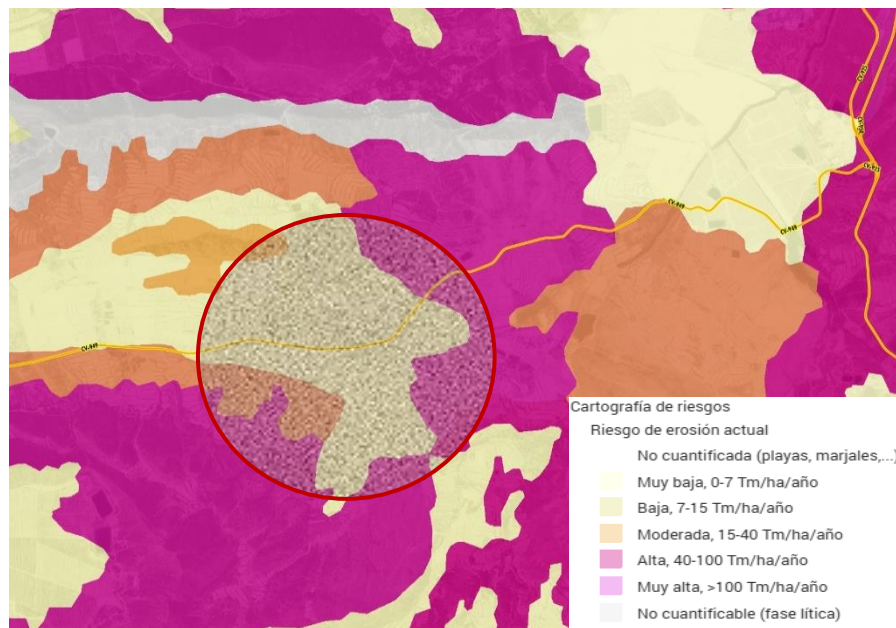


Figura 45. Riesgo de erosión actual de la Alternativa 3. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

El riesgo de inundación se considera bajo, según los parámetros establecidos por el PATRICOVA, mientras que el riesgo de deslizamientos varía entre medio y alto en función de la litología y la pendiente topográfica. Además, las condiciones hidrogeológicas de la zona indican que, a pesar de la baja permeabilidad general y por ende la baja vulnerabilidad de los acuíferos en esta localización, existen desafíos relativos a la escorrentía y al manejo de las altas precipitaciones puntuales.

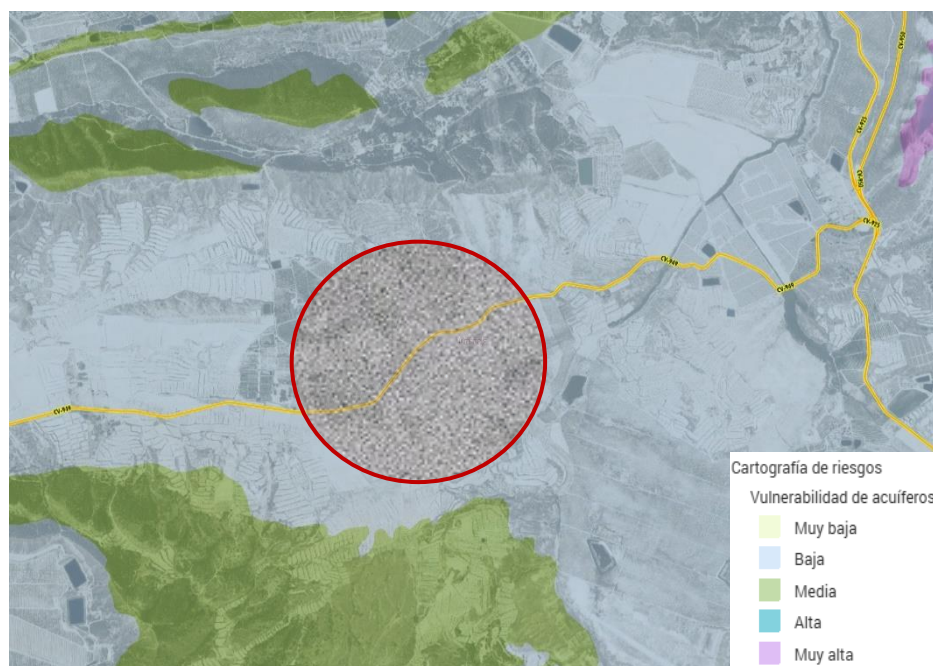


Figura 46. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 3. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#)

La Alternativa 4 se localiza en dos zonas diferenciadas: en la parte norte, las instalaciones destinadas al vertedero de residuos se instalarían en la parcela 125 del polígono catastral 73; mientras que en la parte sur se ubicarían el resto de la infraestructura, en la parcela 105 del polígono 99.



Figura 48. Paraje la Ermita de la Alternativa 4. Fuente: elaboración propia.

El acceso a este emplazamiento se considera adecuado, ya que la carretera CV-954 bordea directamente los terrenos, y la CV-945, vía principal que conecta Orihuela con Torremendo, se encuentra también en las proximidades. Esta configuración viaria facilita la circulación de vehículos pesados, permitiendo un flujo logístico eficiente tanto para el suministro de las instalaciones como para la recogida y transporte de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

El territorio se clasifica como suelo no urbanizable de explotación y cumple con los requisitos legales respecto a las distancias máximas a núcleos poblacionales. Además, presenta una amplia llanura enmarcada por elevaciones montañosas. La superficie se compone mayoritariamente de materiales blandos (margas) en el valle, mientras que en las crestas de las sierras predominan materiales de mayor resistencia. Es por ello, que la gran extensión del terreno y su condición de suelo no urbanizable favorece la implantación de infraestructuras industriales sin interferir en áreas de especial protección ambiental o zonas urbanas ya consolidadas.

Estudio geológico-geotécnico-hidrológico

El análisis del subsuelo indica una estratificación compuesta por cuatro niveles diferenciados: nivel 1, limos arenosos; en el nivel 2, limos arcillosos; en el nivel 3, arcillas margosas y en el nivel 4, areniscas amarillas.

Durante la campaña de sondeos no se detectó la presencia de un nivel freático, lo que es conveniente para la implantación de infraestructuras. Los ensayos in situ mediante infiltrometría han arrojado valores de permeabilidad en el orden de 10^{-5} y 10^{-6} m/s para los niveles 1 y 2, respectivamente; en el laboratorio se han obtenido valores comprendidos entre $1,39 \cdot 10^{-5}$ y cifras inferiores a 10^{-9} m/s. No obstante, según la memoria del anteproyecto, se han estimado valores de permeabilidad entre $5 \cdot 10^{-8}$ m/s y $1 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Resultados de permeabilidad de los Ensayos realizados	Nivel 1, K (m/s)	Nivel 2, K (m/s)	Nivel 3, K (m/s)	Nivel 4, K (m/s)
Infiltrometría	1.62×10^{-5}	1.93×10^{-5}	-	-
Lefranc	4.1×10^{-8}	3.6×10^{-6}	3.6×10^{-7}	-
Lugeon	-	-	-	1.1×10^{-5}

Figura 49. Valores de la infiltrometría de la Alternativa 4. Fuente: Documentos oficiales de la licitación.

Pese a la discrepancia de los datos, según el visor cartográfico de la Generalidad Valenciana, la vulnerabilidad de los acuíferos en la zona se evalúa como baja, lo que refuerza la idoneidad del emplazamiento desde el punto de vista hidrogeológico.

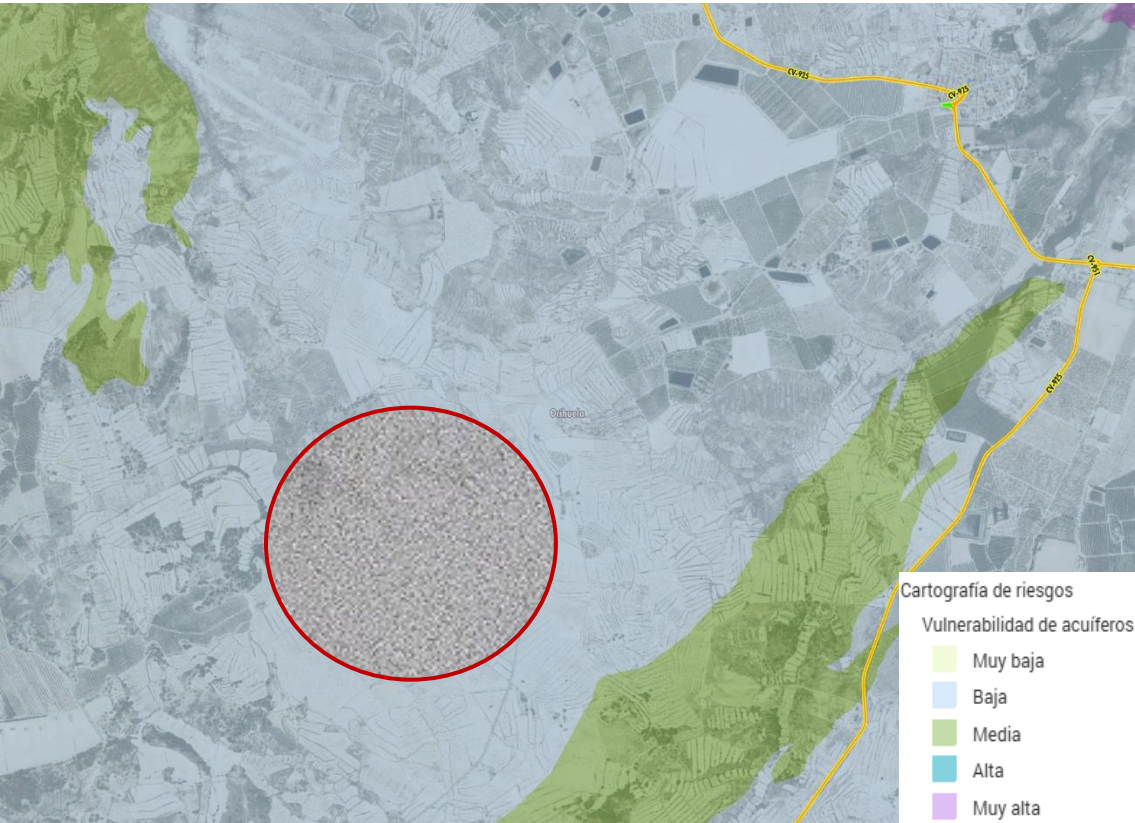


Figura 50. Vulnerabilidad acuíferos de la Alternativa 4. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#).

En cuanto a la erosión, la cartografía clasifica la zona sur del emplazamiento con tasas de erosión actual “bajas”, mientras que la zona oeste presenta tasas “altas” con áreas de erosión “muy baja”. Las tasas de erosión potencial se confirman como elevadas, siendo “moderada” en la zona central y entre “alta” y “muy alta” en el sector suroeste.

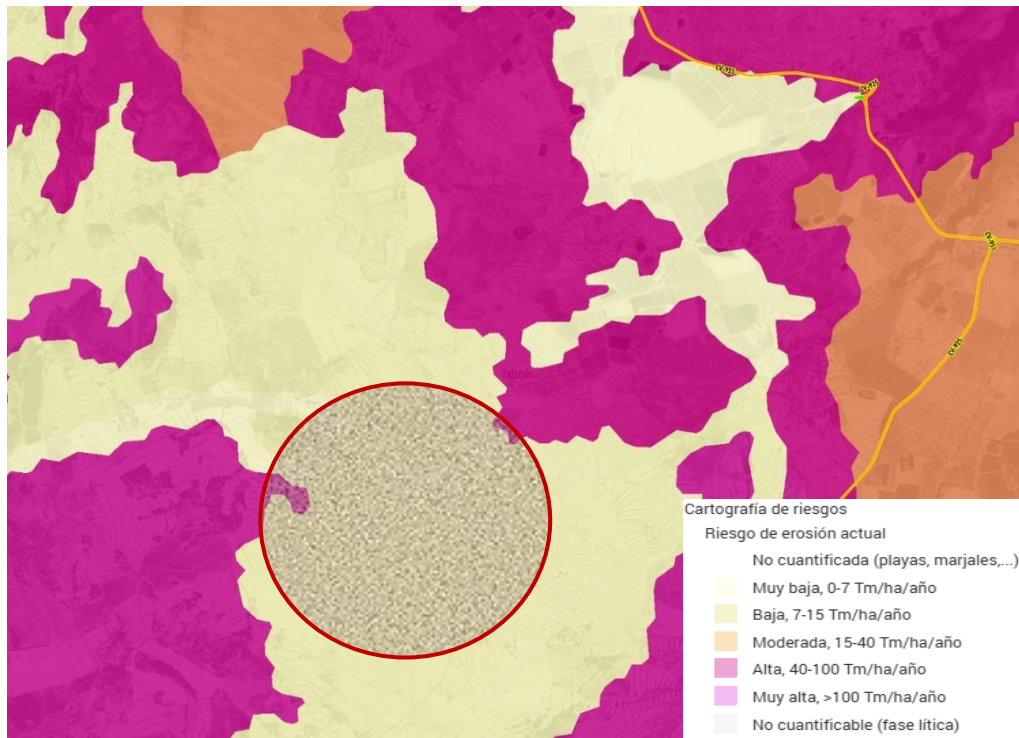


Figura 51. Riesgo de erosión actual de la Alternativa 4. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#).

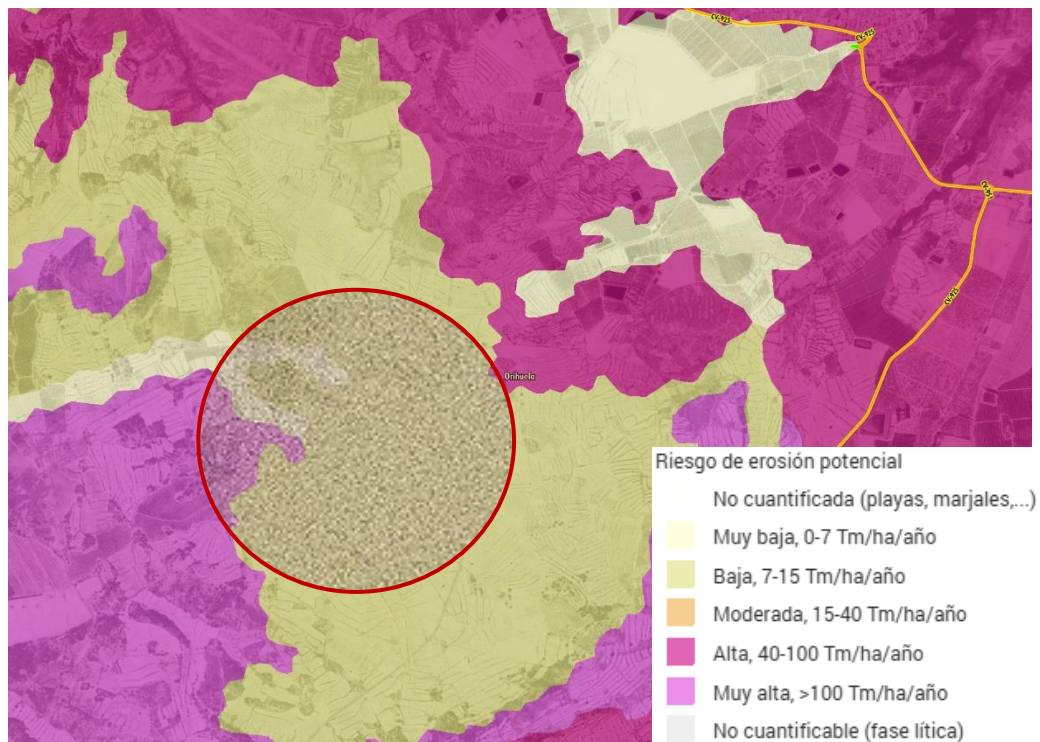


Figura 52. Riesgo de erosión potencial de la Alternativa 4. Fuente: [Visor cartogràfic de la Generalitat](#).

4.5.2. Alternativas de tecnologías

Las tecnologías para el tratamiento de RSU seleccionadas, como alternativas viables, en este estudio han sido obtenidas a partir de varias fuentes complementarias:

Tabla 14. Fuentes empleadas para la elección de alternativas. Fuente: elaboración propia.

CÓDIGO	TÍTULO	SÍNTESIS
WT	Tratamiento de residuos	MTD para el tratamiento físico, químico o biológico de residuos, incluyendo almacenamiento y manipulación.
WI	Incineración de residuos	MTD para incineración y coincineración, enfocadas en control de emisiones y eficiencia energética.
EFS	Emisiones por almacenamiento	MTD para minimizar emisiones durante el almacenamiento de sustancias mediante sellado y control.
ENE	Eficiencia energética	MTD para mejorar la eficiencia energética industrial mediante optimización de procesos y recuperación de calor.
ECM	Efectos económicos y transversales	Análisis de viabilidad económica y efectos cruzados ambientales de las MTD.
MON	Principios generales de monitoreo	Principios para el monitoreo ambiental: métodos de medición, frecuencia y validación de datos.

Todas las opciones cumplen con los requisitos establecidos por la definición de MTD y son:

1. Tratamiento biológico aerobio (**compostaje = T1**)
2. Tratamiento biológico anaerobio (**biometanización= T2**).
3. **Incineración (T3)** con recuperación de energía.
4. Producción de combustibles derivados de residuos (**CDR = T4**).

Estas tecnologías ya han sido detalladas en el **apartado 2 del presente documento**, donde se analizaron sus fundamentos operativos, estado de desarrollo y aplicación en el contexto nacional.

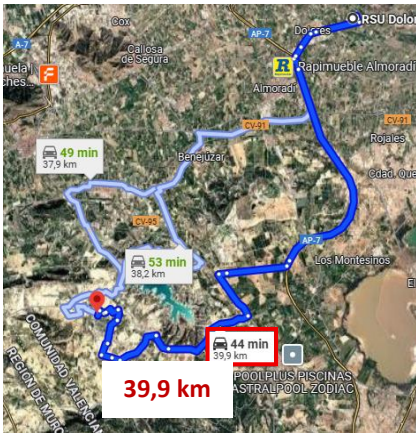
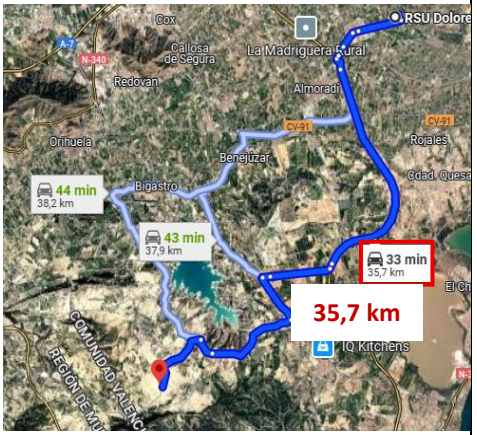
4.5.3. Conclusión

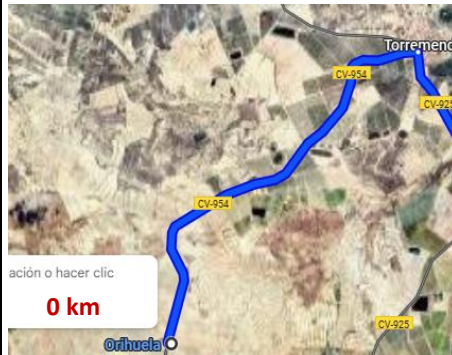
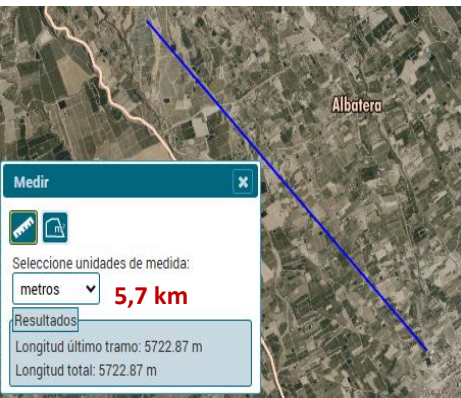
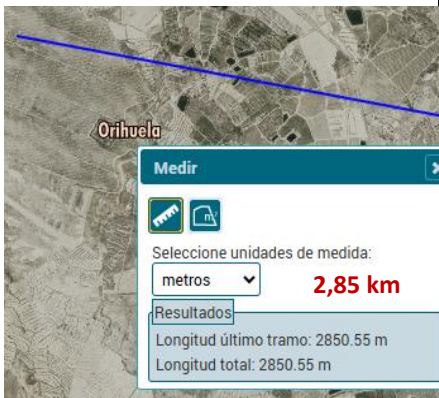
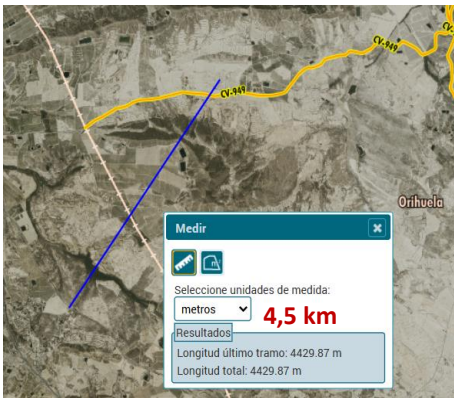
Con la identificación de las alternativas de localización y tratamiento, y habiendo contrastado su validez técnica, normativa y documental, se dispone ya de los dos conjuntos discretos de opciones necesarios para aplicar el análisis multicriterio TOPSIS. Esta doble entrada de alternativas permitirá obtener una solución integrada de la futura instalación de gestión de residuos en la Vega Baja.

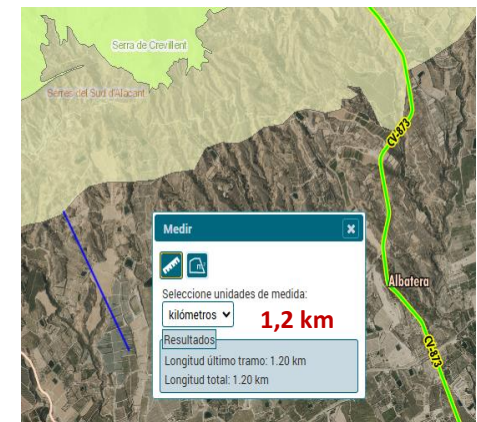
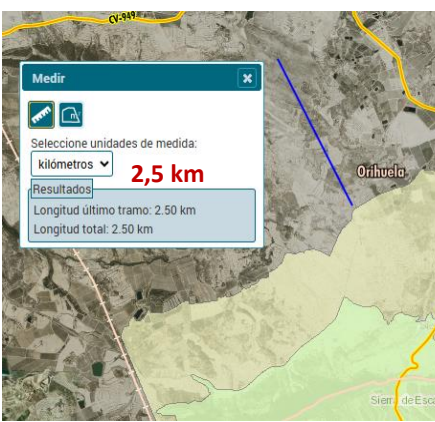
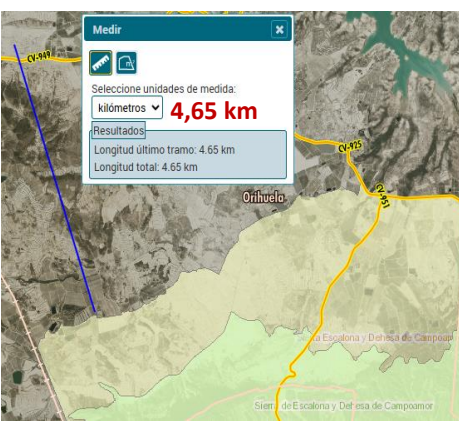
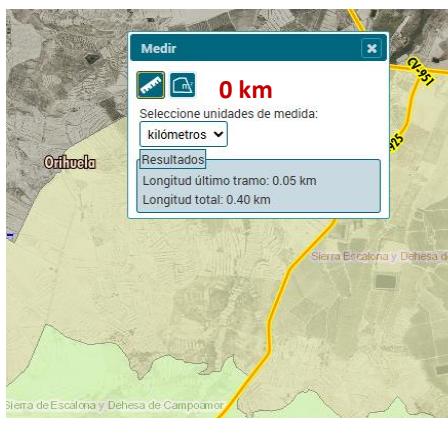
4.6. Definición de criterios y subcriterios

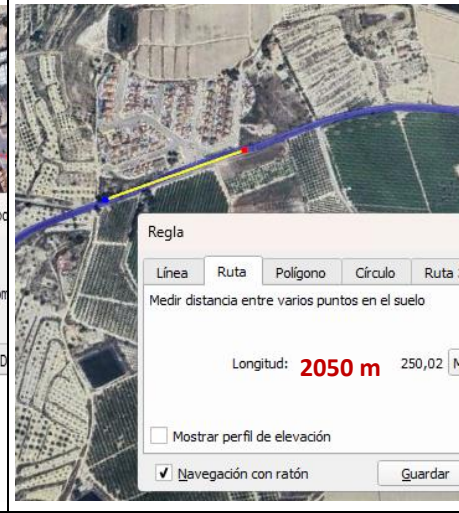
Una vez identificadas las alternativas tanto de localización como de tecnología, el siguiente paso en la aplicación de la propuesta metodológica consiste en la cuantificación y justificación de los valores asignados a cada subcriterio, siempre en función de los condicionantes e hipótesis previamente definidas. Esta etapa es esencial para establecer una base objetiva que permita realizar una comparación rigurosa entre las distintas opciones. A continuación, se presentan dos tablas resumen, donde se recogen los valores sin normalizar, expresados en sus unidades originales, con el fin de facilitar su interpretación, verificación y posterior aplicación del método TOPSIS.

4.6.1. Alternativas de localización

LOCALIZACIÓN			
Distancia de transporte (km) → Desde la estación de transferencia de residuos de Dolores. Se emplea la herramienta de <i>Google Maps</i> para obtener la ruta más favorable.			
A1	A2	A3	A4
			
Disponibilidad de terreno (m ²) → Es el área accesible de terreno para la eliminación de RSU. Se recurre a la documentación técnica disponible como fuente de referencia.			
A1	A2	A3	A4
204.772	240.000	284.620	318.054

Acceso al lugar (km) → Es la distancia lineal entre el emplazamiento y la carretera más cercana. Se emplea la herramienta de <i>Google Maps</i> para obtener la distancia.			
A1	A2	A3	A4
			
Vida útil (m³) → Es el volumen accesible de terreno para la eliminación de RSU. Se recurre a la documentación técnica disponible como fuente de referencia.			
A1	A2	A3	A4
4.561.647	3.511.665	5.357.660	5.357.660
Restricciones en la localización (km) → Es el cumplimiento de distancia mínima a núcleo urbano. Se emplea el visor cartográfico (GVA) para obtener la distancia.			
A1	A2	A3	A4
			

Condiciones Geológicas e Hidrogeológicas (m/s) → Es el valor de la permeabilidad. Se recurre a la documentación técnica disponible como fuente de referencia.			
A1	A2	A3	A4
5·10⁻⁸	10⁻⁸	1,39·10⁻⁵	5·10⁻⁶
Hidrología de aguas superficiales (km) → Mide la proximidad a cuerpos de agua superficiales. Se emplea el visor cartográfico (GVA) para obtener la distancia.			
A1	A2	A3	A4
			
Urbanismo y restricciones ambientales (km) → Mide la proximidad a zonas protegidas. Se emplea el visor cartográfico (GVA) para obtener la distancia.			
A1	A2	A3	A4
			

Condiciones del suelo y topografía (%) → Es el valor de la pendiente media del terreno. Se recurre a la documentación técnica disponible como fuente de referencia.			
A1	A2	A3	A4
4	5	6	3
Condiciones climatológicas (mm) → Es el valor de las precipitaciones anuales. Se recurre a la documentación técnica disponible como fuente de referencia.			
A1	A2	A3	A4
279	300	275	250
Aspectos socioculturales (m) → Es el valor de los m de vía por zona residencial afectada. Se emplea el <i>Google Earth</i> para obtener la distancia total de los tramos de vía.			
A1	A2	A3	A4
			

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos para las diferentes alternativas de localización.

Tabla 15. Tabla resumen de los resultados de las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.

CRITERIOS	ANÁLISIS TOPSIS LOCALIZACIÓN			
CATEGORÍA ECONÓMICO-OPERACIONAL	A1 (Albatera)	A2 (Los Belmontes)	A3 (Las Pistolas)	A4 (La Ermita)
Distancia De Transporte (km)	25,9 (33 mins)	39,9 (44 mins)	35,5 (42 mins)	35,7 (33 mins)
Disponibilidad De Terreno (m ²)	204.772	240.000	284.620	318.054
Acceso Al Lugar (km)	6,8	3,1	1,7	0
Vida Útil del Vertedero (m ³)	4.561.647	3.511.665	5.357.660	5.357.660
CATEGORÍA AMBIENTAL	A1 (Albatera)	A2 (Los Belmontes)	A3 (Las Pistolas)	A4 (La Ermita)
Restricciones En La Localización (km)	5,7	2,85	4,5	2,75
Condiciones Geológicas e Hidrogeológicas (m/s)	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Hidrología De Aguas Superficiales (km)	11,30	2,10	3,78	4,20
Urbanismo y Restricciones Ambientales (km)	1,20	2,50	4,65	0
CATEGORÍA TÉCNICA	A1 (Albatera)	A2 (Los Belmontes)	A3 (Las Pistolas)	A4 (La Ermita)
Condiciones Del Suelo y Topografía (%)	4	5	6	3
Condiciones Climatológicas (mm)	279	300	275	250
CATEGORÍA SOCIOCULTURAL	A1 (Albatera)	A2 (Los Belmontes)	A3 (Las Pistolas)	A4 (La Ermita)
Aspectos Socioculturales	2350	2050	5410	2050

4.6.2. Alternativas de tecnología.

TECNOLOGÍA			
IMPLEMENTACIÓN	T1	5	El compostaje está ampliamente implantado en la gestión de residuos orgánicos municipales. En España, el número de instalaciones de tratamiento de RSU superó las 400 en 2024, “principalmente por la construcción de nuevas plantas de compostaje y biometanización” ²⁴ , lo que refleja su alto grado de implementación. En la UE es una práctica habitual para la fracción orgánica separada.
	T2	5	La biometanización es también muy extendida, especialmente en plantas de residuos orgánicos y agrarias. Al igual que el compostaje, ha crecido notablemente en España en los últimos años. A nivel europeo existen cientos de plantas dedicadas a la digestión de biorresiduos municipales y agrícolas. Muchos municipios han incorporado digestores de fracción orgánica para generar biogás. Además, la Vega Baja se caracteriza por un gran volumen de restos orgánicos y agrícolas. ²⁵
	T3	3	La producción de CDR es una tecnología emergente en España. Existen algunas plantas industriales especializadas y sobre todo cogeneradoras cementeras que utilizan RDF. Su implementación es menor que la del compostaje o digestión: se considera en expansión, pero limitada por la necesidad de instalaciones de calcinación (cementeras, incineradores industriales) que lo consuman ²⁶ . Por tanto, la puntuación es intermedia.
	T4	2	La incineración existe, pero con menor penetración en España. Según datos oficiales, en España “las diez plantas incineradoras en funcionamiento” tratan unos 1,9 millones de toneladas de RSU al año ²⁷ . Aunque son instalaciones robustas, su número es bajo (una o dos por región) debido a restricciones sociales y medioambientales. En la UE la capacidad total es alta, pero en España la implantación efectiva es moderada, no obstante, en la Comunidad Valenciana es baja su aceptación, de ahí la puntuación baja.

²⁴ residuosprofesional.com.

²⁵ [La Vega Baja acogerá plantas de biorresiduos para dar una segunda vida a los restos orgánicos | Alicante Plaza](https://www.alicanteplaza.es/la-vega-baja-acoger%C3%A1-plantas-de-bioresiduos-para-dar-una-segunda-vida-a-los-restos-org%C3%A1nicos/)

²⁶ retema.es.

²⁷ archivo-es.greenpeace.org

ROBUSTEZ	T1	4	El compostaje es una tecnología madura y de bajo riesgo, pues imita procesos naturales de degradación aerobia (por ejemplo, pilas volteadas o túneles) ²⁸ . Requiere equipamiento moderado (mezcladoras, volteadoras) y su operación es estable si se controla humedad y aireación. Aunque factores externos (clima, contenido de impropios) pueden afectar su rendimiento, en general ofrece alta fiabilidad como proceso biológico simple.
	T2	4	La digestión anaerobia es una tecnología consolidada. Según estudios sectoriales, casi todas las instalaciones de digestión de residuos siguen en operación años después de su construcción, demostrando “fiabilidad probada” ²⁹ . La mayoría de las plantas alcanzan sus objetivos de rendimiento en 1–2 años y algunas sobrepasaron su capacidad de diseño inicial, evidenciando su estabilidad operativa ³⁰ . Requiere control de parámetros (pH, temperatura) y manejo de biogás, pero los procesos comerciales (por ejemplo, Valorga, Kompogas, Dranco) han demostrado fiabilidad.
	T3	3	La incineración de residuos municipales es una tecnología muy madura: se utiliza desde hace décadas para reducir volumen de RSU (disminuye en ~90%) y generar energía eléctrica o térmica ³¹ . Las plantas son instalaciones industriales complejas (hornos, calderas, filtros) construidas con estándares de ingeniería avanzada. Son confiables en su operación continua cuando se les da mantenimiento adecuado. Dado su largo historial y reglamentación (normativa LCP, BREF Incineración) se considera muy alta su fiabilidad tecnológica.
	T4	5	La incineración de residuos municipales es una tecnología muy madura: se utiliza desde hace décadas para reducir volumen de RSU (disminuye en ~90%) y generar energía eléctrica o térmica ³² . Las plantas son instalaciones industriales complejas (hornos, calderas, filtros) construidas con estándares de ingeniería avanzada. Son confiables en su operación continua cuando se les da mantenimiento adecuado. Dado su largo historial y reglamentación (normativa LCP, BREF Incineración) se considera muy alta su fiabilidad tecnológica.

²⁸ miteco.gob.es

²⁹ biocycle.net

³⁰ biocycle.net

³¹ nature.com

³² nature.com

CAPACIDAD DE AMPLIACIÓN	T1	3	El escalado del compostaje está limitado por la superficie y tiempo requeridos. Plantas medianas tratan típicamente decenas de miles de toneladas al año; existen proyectos grandes (EE. UU., 250,000 t/año) ³³ , pero en Europa suelen ser más pequeñas. Por ejemplo, la primera planta industrial de compost en Dinamarca (1990) tuvo ~20,000 t/año. Ampliar capacidad implica mayor extensión de pilas o naves, limitando la puntuación.
	T2	4	La biometanización puede implementarse a gran escala; existen digestores que procesan decenas de miles de toneladas al año ³⁴ . Además, pueden integrarse etapas adicionales (prefiltro, compostaje del digestato) para ampliar flujos de tratamiento. Sin embargo, la escalabilidad final está condicionada por la disponibilidad de sustrato orgánico. Aun así, las modernas plantas de tratamiento de RSU suelen combinar tratamiento mecánico con digestión húmeda, por lo que dispone de alta capacidad de ampliación relativa.
	T3	3	El CDR puede producirse a escalas moderadas: por ejemplo, plantas de reciclaje de combustible pueden procesar varias decenas de miles de toneladas al año ³⁵ . El potencial de ampliación está vinculado a la demanda energética en hornos industriales (cemento, acero, calderas). Aunque se planean incrementos en la producción, hoy la capacidad instalada es limitada comparada con incineración. De ahí que la escalabilidad sea media.
	T4	5	Las instalaciones de waste-to-energy pueden ser de escala muy grande. A nivel europeo la capacidad total de incineración actual supera 90 millones de t/año ³⁶ . Esto indica que existen plantas capaces de tratar cientos de miles de toneladas al año. La tecnología admite construirse a gran escala para aglutinar residuos de varias localidades. Por tanto, posee un potencial de ampliación muy alto.

³³ wastetodaymagazine.com

³⁴ biocycle.net

³⁵ retema.es

³⁶ cewep.eu

ESPECIALIZACIÓN	T1	4	Operar un compostador requiere conocimientos de biología de suelos, manejo de residuos y control de parámetros (aireación, humedad), pero se considera relativamente sencillo comparado con otras tecnologías. No exige personal altamente especializado ni sistemas complejos de control. Por tanto, es de bajo nivel de especialización operacional en comparación con, por ejemplo, una incineradora.
	T2	2	Manejar un digestor anaerobio exige personal técnico calificado: se deben gestionar etapas sensibles (acidificación, metanogénesis) y mantener bioseguridad (biogás). La instrumentación (control de temperatura, inyección de nutrientes, desgasificación) y la normativa (seguridad del biogás) requieren conocimientos especializados. Esto implica un nivel de especialización operativa elevado, solo inferior al de la incineración.
	T3	3	Las plantas de CDR requieren operadores capaces de manejar equipos de separación y garantía de la calidad del combustible (control de contenido de humedad, granulometría, PCI). Es más complejo que el compostaje, pero menos especializado que una planta de AD o incineradora. En conjunto se considera nivel medio de especialización
	T4	1	La operación de una incineradora requiere personal altamente especializado. Se manejan procesos de combustión controlados, generación de vapor/energía y limpieza de gases con sistemas avanzados (depuradores catalíticos, filtros electrostáticos). Además, se exige supervisión continua para cumplir normativas ambientales estrictas (emisiones de NOx, dioxinas, etc.). En consecuencia, necesita un equipo de ingenieros y técnicos expertos, situándolo en el nivel máximo de especialización.
ADAPTABILIDAD	T1	3	El compostaje se adapta bien a residuos orgánicos (fracción orgánica de RSU, restos vegetales, lodos). Sin embargo, no puede procesar residuos inorgánicos o inertes. Su adaptabilidad está limitada a la materia orgánica biodegradable. La calidad del compost (fertilizante) depende de un insumo predecible; cambios bruscos en la mezcla pueden dificultar el proceso. Por tanto, se considera moderadamente adaptable dentro del ámbito de los biorresiduos.
	T2	4	Las plantas de AD son flexibles dentro de los residuos biodegradables: pueden digerir múltiples fracciones (fruta/verdura, lodos, cultivos energéticos) y co-digerir biomasa. Según la bibliografía, la mayoría de las instalaciones adaptadas a los RSU demostraron “flexibilidad en respuesta a la demanda

			local ³⁷ . Sin embargo, la calidad del biogás y del digestato depende del sustrato, por lo que no puede procesar inorgánicos ni residuos muy contaminados sin pretratamiento. Aun así, su adaptabilidad funcional a distintas entradas orgánicas es alta.
	T3	3	El CDR es versátil en su uso: puede quemarse en hornos de cemento, cal, siderurgia o plantas eléctricas. La citada industria cementera ha incorporado residuos urbanos como combustible alternativo, reduciendo vertederos ³⁸ . Esta amplia variedad de aplicaciones muestra que, una vez producido, el CDR es adaptable a diferentes procesos térmicos. No obstante, la fabricación de CDR exige flujos de residuos mixtos bien gestionados, por lo que su adaptabilidad está condicionada a esa premisa.
	T4	5	La incineración es muy flexible respecto al tipo de residuo que acepta (especialmente fracción resto no reciclable). Puede procesar RSU mixtos con alto contenido inorgánico o húmedo y también co-incinerar RDF o biomasa. Asimismo, la energía recuperada (calor/vapor) es utilizable en múltiples aplicaciones (electricidad, calefacción urbana). En la práctica europea se considera que la incineración es una de las opciones finales de tratamiento con alta adaptabilidad funcional para flujos residuales indeseables, por lo que recibe la puntuación máxima.
ACEPTACIÓN SOCIAL	T1	4	Suele gozar de buena aceptación, pues vincula reciclaje orgánico y agricultura. Se asocia positivamente con sostenibilidad. Sin embargo, pueden surgir quejas por posibles olores si no se controla bien. En general, con instalaciones adecuadas (ventilación, biofiltros) se considera favorable por la comunidad.
	T2	3	Produce energía renovable, lo que mejora la imagen social, pero la complejidad de la planta y el posible olor a biogás residual son puntos críticos. Si la planta está bien gestionada (digestores cerrados, depuración de efluentes), la comunidad suele apoyarla moderadamente. En países con experiencia, el AD tiene buena percepción, pero requiere campaña informativa.
	T3	3	Al ser una valorización energética indirecta, la percepción depende del uso final. Puede no generar rechazo directo (no hay quema visible en la planta de selección), pero existe incertidumbre pública sobre qué se hace con ese combustible luego. Si se transmite que sustituye combustibles fósiles, puede verse positivamente, aunque la falta de entendimiento genera reservas.

³⁷ biocycle.net

³⁸ retema.es

	T4	2	Históricamente es la menos aceptada. Aunque ofrece gestión de residuos y energía, las incineradoras han sufrido oposición ciudadana (“NIMBY”) por temores a emisiones tóxicas (dioxinas, metales) y al impacto ambiental ³⁹ . La implantación en áreas urbanas resulta especialmente conflictiva y suele requerir fuertes medidas de comunicación y controles ambientales.
COMPATIBILIDAD POLÍTICA	T1	4	Por su alineación con las estrategias de economía circular del PIRCV y el PNRR (2022).
	T2	5	Por su alineación con las estrategias de economía circular del PIRCV y el PNRR (2022).
	T3	3	Aunque se menciona en directrices europeas (2010/75/UE), su mercado nacional aún no está totalmente consolidado (CEWEP, 2023).
	T4	2	Debido a que el PIRCV 2021 relegó las térmicas a un rol secundario por oposición social, aunque las directivas europeas las contemplasen (Directiva 2018/851).
FACILIDAD DE EMPLAZAMIENTO	T1	4	Las instalaciones de compostaje también se localizan comúnmente en zonas industriales o rurales, con buena aceptación social por su papel en la valorización de residuos orgánicos y la producción de compost para uso agrícola. Aunque pueden surgir preocupaciones por olores, una gestión adecuada y la elección de ubicaciones apropiadas mitigan estos impactos ⁴⁰ .
	T2	5	Las plantas de biometanización suelen ubicarse en zonas industriales o periurbanas, donde la aceptación social es generalmente alta debido a su contribución a la producción de energía renovable y a la gestión sostenible de residuos orgánicos. La disponibilidad de suelo en estas áreas facilita su emplazamiento, y los posibles conflictos de uso son mínimos ⁴¹ .
	T3	3	Las plantas de producción de CDR requieren ubicaciones con acceso a infraestructuras de transporte y cercanía a instalaciones de valorización energética. La aceptación social puede variar, y es necesario realizar estudios de impacto ambiental y procesos de participación pública para abordar posibles preocupaciones.

³⁹ miteco.gob.es

⁴⁰ [Guia per al compostatge en granja de dejeccions ramaderes](#)

⁴¹ [Estrategia-Catalana-Biogas-2030 AdG.pdf](#)

	T4	2	Las plantas de incineración enfrentan mayores desafíos en su emplazamiento debido a la percepción pública negativa asociada a las emisiones y al impacto ambiental. Suelen ubicarse en zonas alejadas de núcleos urbanos, lo que puede aumentar los costes logísticos y generar conflictos de uso del suelo.
GENERACIÓN DE EMPLEO	T1	4	Es intensivo en mano de obra (operaciones manuales/semiautomáticas: volteo, mezcla, carga), genera empleo local. Además, demanda personal para logística de residuos y uso agrícola del compost.
	T2	3	Requiere operarios especializados (monitoreo biológico, mantenimiento de motores/generadores) y personal para procesamiento de digestato, pero en menor escala que el compostaje. Ofrece empleos técnicos y de mantenimiento continuos.
	T3	2	La fabricación de CDR se realiza en plantas de clasificación mecánica automatizada (riego de cintas, trituradores), con menos mano de obra directa. La cadena laboral se centra más en ingeniería y mantenimiento de la línea de proceso.
	T4	2	Aunque una planta de incineración es grande, requiere relativamente pocos operarios (automatización elevada). El empleo local es limitado (operadores y técnicos de alto nivel), siendo menos intensivo en puestos de trabajo que las tecnologías biológicas.
VULNERABILIDAD ANTE MOLESTIAS	T1	2	Puede generar olores ofensivos (putrefacción, amoníaco) si no hay buena aireación y biofiltración. Las operaciones de volteo y pilas abiertas acentúan esto. Además, el movimiento de maquinaria pesada genera ruido. Una planta de compostaje mal diseñada suele recibir quejas vecinales por olor.
	T2	3	Al ser un sistema cerrado de digestores, los olores pueden controlarse mejor que en pilas abiertas; sin embargo, durante la descarga o si hay fugas, se perciben olores a estiércol o sulfhídrico. El ruido proviene de bombas y motores de cogeneración, pero suele mitigarse. En general causa molestias moderadas si se mantiene correctamente.
	T3	4	La planta de CDR involucra trituración y peletización con poca generación de olores (no hay materia orgánica). El ruido existe (equipos de clasificación, ventiladores), pero la instalación suele estar en polígonos industriales alejados de viviendas. Por ello, las molestias directas son relativamente bajas.

	T4	3	La incineradora, al ubicarse fuera de zonas pobladas, no genera olor doméstico (buena combustión elimina gases putrefactos). Produce ruido de ventiladores y calderas, pero suele ser tolerable a distancia. Con controles adecuados el nivel de molestia es medio, inferior al compostaje descontrolado, pero no tan bajo como otras tecnologías pasivas.
COSTE DE CONSTRUCCIÓN	T1	4	Las plantas de compostaje requieren infraestructura sencilla (volteos, pilas cubiertas), por lo que la inversión es moderada. Por ejemplo, en Lanzarote se anunció una planta de 4.375 t/año por $\approx 7 \text{ M€}^{42}$ ($\approx 1.600 \text{ €/t-año}$), lo que encaja en la categoría “Bajo” (1.000–2.000 €/t-año).
	T2	3	Los digestores anaeróbicos son tanques complejos y costosos. Estudios indican costes de obra civil y digestores en rangos de 0,6–1,5 M€ ⁴³ ; escalado a capacidad implica precios del orden de varios miles €/t. Un valor típico podría rondar 2.000–3.000 €/t-año)
	T3	5	Las plantas de Combustible Derivado de Residuos (CDR) en España suelen operar a gran escala. Por ejemplo, la instalación de FCC en Castellbisbal (Barcelona) posee una capacidad para tratar 45 000 t/año y fabricó su primera línea con una inversión de 3,5 M€. Esto equivale a aproximadamente 78 €/t-año ⁴⁴ (< 1 000 €/t-año).
	T4	1	Las incineradoras exigen inversiones enormes (hornos, calderas, depuradoras). GAIA señala que la incineración es “innegablemente costosa” y los costes (capital y operativos) son de los más altos en gestión de residuos ⁴⁵ . En la práctica, una planta grande supera con creces 5.000 €/t-año.

⁴² retema.es.

⁴³ proyectos.citoliva.es.

⁴⁴ [FCC commissions its first refuse-derived fuel plant - FCC](http://FCC.commissions%20its%20first%20refuse-derived%20fuel%20plant%20-%20FCC)

⁴⁵ no-burn.org.

COSTE OPERACIÓN	T1	5	El coste operativo (volteo, riego, energía auxiliar) es muy bajo. En plantas municipales suele rondar decenas de €/t, típicamente <30 €/t.
	T2	4	Requiere mantenimiento de equipos (mezcladores, control de emisiones), pero produce energía/biogás. Esto suele situarlo en costes operativos moderadamente bajos (~30–60 €/t).
	T3	4	Incluye trituración, secado y empaquetado. Al generarse un combustible de valor, se compensa parte del coste. En general sus costes operativos se estiman en el rango 30–60 €/t.
	T4	3	Los costes de operación (personal, mantenimiento, tratamiento de gases) son altos. En España la tarifa media ponderada de incineración ronda ~63 €/t ⁴⁶ (un valor de ~65 €/t).
RENTABILIDAD ECONÓMICA	T1	3	En general arroja bajos márgenes; sin apoyo, el equilibrio depende del coste de oportunidad del vertido. Puede tener dificultades de rentabilidad pura, pero su bajo CAPEX y OPEX ayudan. Se puntúa medio-bajo porque suele requerir incentivos o ser parte de un servicio público asumido.
	T2	3	Puede ser rentable gracias a la venta de energía renovable y economías de escala, pero el alto CAPEX y los costes operativos largos pueden alargar la recuperación. Con el apoyo de subvenciones (certificados verdes, ayudas LEADER, etc.) su rentabilidad aumenta; sin ellas, la TIR puede ser moderada.
	T3	2	Como fuente de ingresos directa es limitada, y depende de evitar coste de eliminación. Su rentabilidad se basa en sustituir combustibles fósiles en cemento/incineración; la ventaja económica es modesta, por lo que sin políticas de apoyo su calificación queda baja.
	T4	4	La incineración de residuos permite la generación de energía eléctrica, que puede ser vendida al mercado. Sin embargo, el elevado CAPEX y OPEX y la dependencia de los ingresos en función del precio de la electricidad y de las políticas de incentivos reducen la rentabilidad neta. Según Greenpeace, en 2009 la incineración de residuos en España recibió 37,8 millones de euros en aportaciones reglamentarias. Los ingresos pueden reducir significativamente los costes netos. ⁴⁷

⁴⁶ archivo-es.greenpeace.org.

⁴⁷ archivo-es.greenpeace.org.

VIABILIDAD FINANCIERA A LARGO PLAZO CONTAMINANTES	T1	5	El compostaje es una tecnología consolidada con múltiples inversores y proyectos en marcha. Su viabilidad financiera a largo plazo es alta debido a su bajo coste operativo y a la creciente demanda de productos orgánicos en la agricultura.
	T2	4	Respaldada por políticas de energías renovables, como la Hoja de Ruta del Biogás del MITECO, la biometanización tiene un alto potencial de crecimiento. Sin embargo, enfrenta desafíos como la necesidad de inversiones iniciales significativas y la dependencia de incentivos gubernamentales. ⁴⁸
	T3	3	La viabilidad financiera del CDR está sujeta a la demanda del mercado energético y a las políticas ambientales. La incertidumbre en la demanda de RDF y las posibles restricciones regulatorias pueden afectar su sostenibilidad económica.
	T4	2	La incineración requiere una inversión inicial elevada y su rentabilidad depende de los precios de la energía y de las políticas de incentivos. Además, enfrenta oposición social y posibles restricciones regulatorias.
EMISIONES CONTAMINANTES	T1	4	El compostaje estabiliza la materia orgánica evitando la generación de metano en vertedero; emite CO ₂ “biogénico” sin incrementar la huella neta de GEI, y sus emisiones locales se limitan a pequeñas cantidades de NH ₃ y olores puntuales, controlables con una correcta gestión de biolixiviados (EPA; MITECO 2022). Su casi neutralidad climática (Global Warming Potential = 0) y perfil bajo de tóxicos, se valora positivamente ⁴⁹ .
	T2	5	Este proceso captura la mayor parte del metano como biogás, que se convierte en energía renovable, reduciendo notablemente la huella de GEI; las emisiones locales quedan reducidas a CO ₂ biogénico y trazas de NH ₃ al manejar el digestato (EBA 2023; MITECO 2022). Su alta eficacia en mitigación de GEI y bajas emisiones de tóxicos justifican la máxima puntuación.
	T3	2	Al final el CDR se quema (en incineradora o co-incineración), liberando CO ₂ de la fracción orgánica y de los residuos plásticos (carbón fósil). Solo evita metano de vertedero indirectamente, pero en la práctica es comparable a la incineración en términos de emisiones GEI. En su uso térmico se generan NO _x , partículas, HCl y trazas de dioxinas según el control de emisiones (CEWEP 2023), por ello tiene un alto impacto climático relativo.

⁴⁸ [Hoja de Ruta del Biogás V6](#),

⁴⁹ [epa.gov](#).

	T4	2	Libera CO ₂ de la materia orgánica y plásticos al quemarlos; aunque se evita metano de vertedero, el CO ₂ y contaminantes tóxicos (NO _x , SO _x , HCl, partículas, metales volátiles y dioxinas) emitidos son significativos. Pese a la recuperación energética que solo reduce parcialmente la demanda de combustibles fósiles (evita gas natural u otros) (IPCC AR6 2022; MITECO 2022), sigue generando GEI. Dada la alta eficiencia térmica, su indicador global es moderadamente alto en emisiones.
RIESGO BIOLÓGICO	T1	4	En condiciones adecuadas el compostaje higieniza los desechos orgánicos. Las fases termófilas alcanzan 60–70 °C ⁵⁰ eliminando patógenos. Si se cumple la maduración, el compost final es inocuo para la salud. Sin embargo, mal manejo (vuelta continua) puede generar vectores biológicos u olores, por lo que requiere control de bioseguridad.
	T2	4	Similar al compostaje, los reactores termófilos de digestión pueden esterilizar buena parte de gérmenes. Además, el proceso cerrado evita la mayoría de las emisiones directas. El digestato, si se trata y almacena adecuadamente, es relativamente seguro. Los riesgos principales son fugas de biogás (metano) o derrames de líquidos, que pueden minimizarse con buenas prácticas.
	T3	2	La fabricación de CDR en sí no implica materia orgánica biodegradable ni patógenos, pero su combustión (en cementeras o incineradores) libera emisiones que pueden afectar la salud (p.ej. partículas, metales). Aunque esos procesos cuentan con depuración, existen emisiones residuales. Por tanto, el riesgo sanitario indirecto existe por la quema posterior del CDR.
	T4	1	Aun con estrictos filtros y controles, la incineración puede emitir trazas de dioxinas, furanos, metales pesados y partículas contaminantes ⁵¹ . La salud pública se ve protegida por la tecnología de depuración, pero el potencial daño es mayor que en tecnologías biológicas. En consecuencia, tiene la calificación más baja en este criterio.

⁵⁰ miteco.gob.es.

⁵¹ miteco.gob.es

OCUPACIÓN DEL SUELO	T1	1	Requiere grandes superficies al aire libre para pilas y secaderos. Por cada tonelada/año instalada se necesitan típicamente más de 10 m ² (volúmenes de residuos y espacio para maduración)
	T2	3	Requiere grandes superficies al aire libre para pilas y secaderos. Por cada tonelada/año instalada se necesitan típicamente más de 10 m ² (volúmenes de residuos y espacio para maduración).
	T3	4	El proceso mecánico de triturado y secado se concentra en naves cubiertas. Suele requerir poca superficie por unidad de capacidad (1–3 m ² /t)
	T4	5	Las plantas de incineración son de gran capacidad en naves cerradas, con muy alta densidad. Por tonelada/año necesitan menos de 1 m ² en la práctica (poca área por alta capacidad).
RECUPERACIÓN/ELIMINACIÓN DE RESIDUOS	T1	4	Transforma materia orgánica en compost reutilizable. Reduce significativamente masa/volumen de los residuos (homogeneiza y valoriza la fracción orgánica) ⁵² . Su eficiencia suele estar entre 60–85 %.
	T2	5	Transforma la materia orgánica en biogás (metano), que puede usarse para cogeneración de electricidad y calor, aportando energía renovable. Su rendimiento energético depende de la calidad del sustrato; si hay muchos impropios disminuye su eficiencia ⁵³ . La mayor parte del contenido energético y nutritivo de los orgánicos se recupera, superando 85 % en eficiencia de valorización.
	T3	5	Se obtiene un combustible de alto poder calorífico a partir de los residuos no reciclables. En instalaciones adaptadas (hornos cementeros o cogeneración) permite recuperar una fracción importante de energía, con combustión estable y bajas emisiones de carbono. Casi todo el residuo procesado se valoriza energéticamente, por encima de 85 %.

⁵² miteco.gob.es.

⁵³ miteco.gob.es

	T4	5	Es la tecnología de máxima eficiencia energética para RSU. A 900–1200 °C convierte gran parte de la energía química del residuo en calor aprovechable, usado para producir vapor y generar electricidad ⁵⁴ . Prácticamente todo el carbono orgánico se oxida, obteniendo la mayor recuperación energética entre las opciones. Globalmente más del 85 % de la materia se valoriza en forma de energía/recursos.
--	----	---	---

A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados obtenidos para todos los subcriterios tecnológicos, los cuales han sido valorados en una escala de 1 a 5.

Tabla 16. Tabla resumen de los resultados de las alternativas tecnológicas. Fuente: elaboración propia.

CRITERIOS	ANÁLISIS TOPSIS TECNOLOGÍA			
CATEGORÍA TÉCNICA	T1 (Compostaje)	T2 (Biometanización)	T3 (CDR)	T4 (Incineración)
Implementación	5	5	3	2
Robustez tecnológica	4	4	3	5
Capacidad de ampliación	3	4	3	5
Nivel de especialización operativa	4	2	3	1
Adaptabilidad funcional	3	4	3	5
CATEGORÍA SOCIOCULTURAL	T1 (Compostaje)	T2 (Biometanización)	T3 (CDR)	T4 (Incineración)
Aceptación social	4	3	3	2
Compatibilidad política	4	5	3	2
Facilidad emplazamiento	4	5	3	2
Generación de empleo	4	3	2	2

⁵⁴ miteco.gob.es.

Vulnerabilidad ante molestias	2	3	4	3
CATEGORÍA ECONÓMICA	T1 (Compostaje)	T2 (Biometanización)	T3 (CDR)	T4 (Incineración)
Coste de construcción	4	3	5	1
Coste de operación y mantenimiento	5	4	4	3
Rentabilidad económica	3	3	2	4
Viabilidad financiera a largo plazo	5	4	3	2
CATEGORÍA MEDIO AMBIENTAL	T1 (Compostaje)	T2 (Biometanización)	T3 (CDR)	T4 (Incineración)
Emisiones contaminantes	4	5	2	2
Riesgo biológico	4	4	2	1
Ocupación del suelo	1	3	4	5
Recuperación/eliminación de residuos	4	5	5	5

El presente apartado ha permitido establecer una base sólida y objetiva para la evaluación comparativa de las alternativas de localización y tecnología en el marco del análisis multicriterio. A través de la definición detallada de los subcriterios, se han integrado de forma estructurada factores clave como el impacto ambiental, los costes operativos, la accesibilidad y la compatibilidad territorial, todos ellos fundamentales para una planificación eficiente y sostenible de las infraestructuras de gestión de residuos sólidos urbanos.

Las tablas resumen elaboradas recogen los valores asignados a cada subcriterio para las diferentes alternativas, sirviendo como matriz de decisión para el posterior análisis TOPSIS. Estos valores se han fundamentado en normativa sectorial vigente, informes técnicos especializados y documentación oficial, complementados cuando ha sido necesario con estimaciones razonadas y justificadas técnicamente.

Este proceso ha garantizado una valoración transparente, replicable y basada en evidencias, minimizando así la subjetividad. La normalización de los datos y la aplicación de ponderaciones permitirán, en los siguientes apartados, identificar con precisión las opciones más próximas a la solución ideal, reforzando la fiabilidad del modelo multicriterio propuesto.

4.7. Determinación de pesos

Una vez definidos y justificados todos los subcriterios correspondientes a las alternativas de localización y a las opciones tecnológicas consideradas, en este apartado se aborda la implementación práctica del procedimiento de ponderación expuesto en el apartado [3.5 Determinación de pesos](#), de la propuesta metodológica, adaptándolo al caso específico del Plan Zonal de Residuos de la Vega Baja (PZ11 – AGA6). El objetivo es establecer, de manera objetiva, sistemática y reproducible, la influencia relativa de cada criterio en la valoración global de las distintas alternativas planteadas para la gestión de residuos sólidos urbanos en el ámbito territorial analizado.

El desarrollo del análisis se estructura en tres fases claramente diferenciadas. En primer lugar, se presenta la matriz de decisión correspondiente al caso base del método TOPSIS, en el que todos los subcriterios son ponderados con el mismo valor, lo que permite establecer un escenario de referencia neutro. A continuación, se aplica la metodología de simulación Montecarlo para generar múltiples combinaciones de pesos y analizar cómo estas afectan al orden de preferencia de las alternativas, tanto para la ubicación de las instalaciones como para la tecnología a implantar. Finalmente, se incorpora un análisis de sensibilidad con el objetivo de identificar qué subcriterios ejercen un mayor impacto sobre la clasificación final, aportando así una visión clara sobre la robustez del modelo y sobre los factores clave que condicionan la toma de decisiones. A continuación, se abordan, para ambas alternativas, los distintos aspectos que conforman este apartado:

4.7.1. Presentación de la matriz base TOPSIS.

Aunque el escenario base contempla una situación de igualdad en la importancia de todos los criterios (es decir, se les asigna un peso uniforme), esta configuración, si bien útil como referencia inicial, resulta poco representativa desde un punto de vista técnico y estratégico.

ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN

En primer lugar, a partir de la tabla resumen del apartado [4.6.1](#) sobre las alternativas de localización, se obtiene la matriz X y se procede a la definición de las soluciones ideales positiva (A_i^+) y negativa (A_i^-).

Tabla 17. Soluciones ideales del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	max/min	ALTERNATIVAS				A ⁺ (best)	A ⁻ (worst)
		A1	A2	A3	A4		
Distancia De Transporte	min	25,90	39,90	35,50	35,70	25,90	39,90
Disponibilidad De Terreno	max	2,05E+05	2,40E+05	2,85E+05	3,18E+05	3,18E+05	2,05E+05
Acceso Al Lugar	min	6,80	3,10	1,70	0,00	0,00	6,80
Vida Útil del Vertedero	max	4,56E+06	3,51E+06	5,36E+06	5,36E+06	5,36E+06	3,51E+06
Restricciones En La Localización	max	5,70	2,85	4,50	2,75	5,70	2,75
Condiciones Hidro/Geológicas	min	5,00E-08	1,00E-08	1,39E-05	5,00E-06	1,00E-08	1,39E-05
Hidrología De Aguas Superficiales	max	11,30	2,10	3,78	4,20	11,30	2,10
Restricciones Ambientales/Urbanismo	max	1,20	2,50	4,65	0,00	4,65	0,00
Condiciones Del Suelo y Topografía	min	4,00	5,00	6,00	3,00	3,00	6,00
Condiciones Climatológicas	min	279,00	300,00	275,00	250,00	250,00	300,00
Aspectos Socioculturales	min	2350	2050	5410	2050	2050,00	5410,00

En la columna *max/min* de esta tabla conviene señalar que algunos subcriterios representan variables de beneficio, por lo que un valor más elevado implica una mejor alternativa, mientras que en otros casos ocurre lo contrario, siendo preferibles valores más bajos para reflejar un mejor desempeño de las variables coste.

A continuación, se procede a la normalización de la matriz, aplicando la fórmula mostrada en el paso 3 del subapartado [4.4 Selección del método](#):

Tabla 18. Matriz r_{ij}^+ del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL POSITIVO			
		A1	A2	A3	A4
Distancia De Transporte	min	0,000	1,000	0,686	0,700
Disponibilidad De Terreno	max	1,000	0,689	0,295	0,000
Acceso Al Lugar	min	1,000	0,456	0,250	0,000
Vida Útil del Vertedero	max	0,431	1,000	0,000	0,000
Restricciones En La Localización	max	0,000	0,966	0,407	1,000
Condiciones Hidro/Geológicas	min	0,003	0,000	1,000	0,359
Hidrología De Aguas Superficiales	max	0,000	1,000	0,817	0,772
Restricciones Ambientales/Urbanismo	max	0,742	0,462	0,000	1,000
Condiciones Del Suelo y Topografía	min	0,333	0,667	1,000	0,000
Condiciones Climatológicas	min	0,580	1,000	0,500	0,000
Aspectos Socioculturales	min	0,089	0,000	1,000	0,000

Tabla 19. Matriz r_{ij}^- del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL NEGATIVO			
		A1	A2	A3	A4
Distancia De Transporte	min	-1,000	0,000	-0,314	-0,300
Disponibilidad De Terreno	max	0,000	-0,311	-0,705	-1,000
Acceso Al Lugar	min	0,000	-0,544	-0,750	-1,000
Vida Útil del Vertedero	max	-0,569	0,000	-1,000	-1,000
Restricciones En La Localización	max	-1,000	-0,034	-0,593	0,000
Condiciones Hidro/Geológicas	min	-0,997	-1,000	0,000	-0,641
Hidrología De Aguas Superficiales	max	-1,000	0,000	-0,183	-0,228
Restricciones Ambientales/Urbanismo	max	-0,258	-0,538	-1,000	0,000
Topografía	min	-0,667	-0,333	0,000	-1,000
Condiciones Climatológicas	min	-0,420	0,000	-0,500	-1,000
Aspectos Socioculturales	min	-0,911	-1,000	0,000	-1,000

En ambas tablas, un valor igual a 0 indica que la alternativa (A_i) se encuentra más próxima al ideal correspondiente, mientras que los valores cercanos a 1 (para el ideal positivo) o a -1 (para el ideal negativo) representan la mayor lejanía respecto a dichos referentes. Por tanto, la alternativa más favorable será aquella que, en la mayoría de los subcriterios (C_j), presente valores próximos a 0 en la distancia al ideal positivo y cercanos a -1 en la distancia al ideal negativo.

Seguidamente, se procede a ponderar cada columna aplicando los pesos normalizados asignados a cada subcriterio (v_{ij}).

Tabla 20. Ponderación del ideal positivo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Pesos
	A1	A2	A3	A4	
Distancia De Transporte	0,000	0,008	0,004	0,004	0,090
Disponibilidad De Terreno	0,008	0,004	0,001	0,000	0,090
Acceso Al Lugar	0,008	0,002	0,001	0,000	0,090
Vida Útil del Vertedero	0,002	0,008	0,000	0,000	0,090
Restricciones En La Localización	0,000	0,008	0,001	0,008	0,090
Condiciones Hidro/Geológicas	0,000	0,000	0,008	0,001	0,090
Hidrología De Aguas Superficiales	0,000	0,008	0,005	0,005	0,090
Restricciones Ambientales/Urbanismo	0,004	0,002	0,000	0,008	0,090
Condiciones Del Suelo y Topografía	0,001	0,004	0,008	0,000	0,090
Condiciones Climatológicas	0,003	0,008	0,002	0,000	0,090
Aspectos Socioculturales	0,000	0,000	0,008	0,000	0,090

Tabla 21. Ponderación del ideal negativo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL NEGATIVO				Pesos
	A1	A2	A3	A4	
Distancia De Transporte	0,008	0,000	0,001	0,001	0,090
Disponibilidad De Terreno	0,000	0,001	0,004	0,008	0,090
Acceso Al Lugar	0,000	0,002	0,005	0,008	0,090
Vida Útil del Vertedero	0,003	0,000	0,008	0,008	0,090
Restricciones En La Localización	0,008	0,000	0,003	0,000	0,090
Condiciones Hidro/Geológicas	0,008	0,008	0,000	0,003	0,090
Hidrología De Aguas Superficiales	0,008	0,000	0,000	0,000	0,090
Restricciones Ambientales/Urbanismo	0,001	0,002	0,008	0,000	0,090
Suelo y Topografía	0,004	0,001	0,000	0,008	0,090
Condiciones Climatológicas	0,001	0,000	0,002	0,008	0,090
Aspectos Socioculturales	0,007	0,008	0,000	0,008	0,090

Finalmente, se calcula la distancia euclídea de cada alternativa mediante la suma de sus distancias al ideal positivo (D^+) y al ideal negativo (D^-), lo que permite determinar su proximidad relativa a la solución óptima.

Tabla 22. Sumatorio de las distancias al ideal positivo y negativo del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

	A1	A2	A3	A4
D+	0,161	0,225	0,195	0,161
D-	0,217	0,150	0,175	0,230

Para el cálculo del índice de proximidad relativa (C_j^*) se aplica la siguiente fórmula:

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-}$$

Tabla 23. Resultado del análisis TOPSIS para la localización. Fuente: elaboración propia.

	A1	A2	A3	A4
C^*	0,575	0,400	0,473	0,588

Tal como se indica en la fórmula, cuanto más próximo sea el valor a la unidad, mayor será la proximidad al ideal positivo y, por tanto, mayor la distancia respecto al ideal negativo. Por ello, la alternativa más favorable para la localización de las instalaciones de valorización y eliminación es la **Alternativa 4 (Orihuela – La Ermita)**, seguida de la **Alternativa 1 (Albatera)**.

ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍA

Siguiendo con el mismo proceso que en las *Alternativas de localización*, a partir de la tabla resumen del apartado 4.6.2 sobre las alternativas de tecnología, se procede a la definición de las soluciones ideales positiva (A^+) y negativa (A^-).

Tabla 24. Soluciones ideales del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	max/min	ALTERNATIVAS				A ⁺ (best)	A ⁻ (worst)
		Compost	Bio	Inc	CDR		
Implementación	max	5,00	5,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Robustez	max	4,00	4,00	3,00	5,00	5,00	3,00
Capacidad de ampliación	max	3,00	4,00	3,00	5,00	5,00	3,00
Especialización	max	4,00	2,00	3,00	1,00	4,00	1,00
Adaptabilidad funcional	max	3,00	4,00	3,00	5,00	5,00	3,00
Aceptación social	max	4,00	3,00	3,00	2,00	4,00	2,00
Compatibilidad/flexibilidad política	max	4,00	5,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Facilidad de emplazamiento	max	4,00	5,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Generación de empleo	max	4,00	3,00	2,00	2,00	4,00	2,00
Vulnerabilidad de molestias	max	2,00	3,00	4,00	3,00	4,00	2,00
Coste de construcción	max	4,00	3,00	5,00	1,00	5,00	1,00
Coste de operación	max	5,00	4,00	4,00	3,00	5,00	3,00
Rentabilidad económica	max	3,00	3,00	2,00	4,00	4,00	2,00
Viabilidad financiera	max	5,00	4,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Emisiones contaminantes	max	4,00	5,00	2,00	2,00	5,00	2,00
Riesgo biológico	max	4,00	4,00	2,00	1,00	4,00	1,00
Ócupación de suelo	max	1,00	3,00	4,00	5,00	5,00	1,00
Recuperación/eliminación de RSU	max	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00

En este caso, con el objetivo de simplificar el análisis, todos los subcriterios han sido definidos en la columna *max/min* como variables de beneficio, de modo que un valor más alto indica una mayor idoneidad de la alternativa evaluada.

A continuación, se normaliza la matriz, X , obteniendo la matriz $R^{+/-} = [r_{ij}^{+/-}]$.

Tabla 25. Ponderación del ideal positivo del análisis TOPSIS para las tecnologías Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL POSITIVO			
		Compost	Bio	CDR	Inc
Implementación	max	0,000	0,000	0,667	1,000
Robustez	max	0,500	0,500	1,000	0,000
Capacidad de ampliación	min	1,000	0,500	1,000	0,000
Especialización	min	0,000	0,667	0,333	1,000
Adaptabilidad	max	1,000	0,500	1,000	0,000
ceptación social	max	0,000	0,500	0,500	1,000
Compatibilidad/flexibilidad política	max	0,333	0,000	0,667	1,000
Facilidad del emplazamiento	max	0,333	0,000	0,667	1,000
Empleo	max	0,000	0,500	1,000	1,000
Vulnerabilidad de molestias	min	1,000	0,500	0,000	0,500
Coste de construcción	min	0,250	0,500	0,000	1,000
Coste de operación	min	0,000	0,500	0,500	1,000
Rentabilidad económica	max	0,500	0,500	1,000	0,000
Viabilidad financiera	max	0,000	0,333	0,667	1,000
Emisiones contaminantes	min	0,333	0,000	1,000	1,000
Riesgo biológico	min	0,000	0,500	0,250	0,000
Ócupación de suelo	min	1,000	0,500	0,250	0,000
Recuperación/eliminación de RSU	max	1,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 26. Ponderación del ideal negativo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL NEGATIVO			
		Compost	Bio	CDR	Inc
Implementación	max	-1,000	-1,000	-0,333	0,000
Robustez	max	-0,500	-0,500	0,000	-1,000
Capacidad de ampliación	min	0,000	-0,500	0,000	-1,000
Especialización	min	-1,000	-0,333	-0,667	0,000
Adaptabilidad	max	0,000	-0,500	0,000	-1,000
Ceptación social	max	-1,000	-0,500	-0,500	0,000
Compatibilidad/flexibilidad política	max	-0,667	-1,000	-0,333	0,000
Facilidad del emplazamiento	max	-0,667	-1,000	-0,333	0,000
Empleo	max	-1,000	-0,500	0,000	0,000
Vulnerabilidad de molestias	min	0,000	-0,500	-1,000	-0,500
Coste de construcción	min	-0,750	-0,500	-1,000	0,000
Coste de operación	min	-1,000	-0,500	-0,500	0,000
Rentabilidad económica	max	-0,500	-0,500	0,000	-1,000
Viabilidad financiera	max	-1,000	-0,667	-0,333	0,000
Emisiones contaminantes	min	-0,667	-1,000	0,000	0,000
Riesgo biológico	min	-1,000	-1,000	-0,333	0,000
Ócupación de suelo	min	0,000	-0,500	-0,750	-1,000
Recuperación/eliminación de RSU	max	0,000	-1,000	-1,000	-1,000

Seguidamente, se procede a ponderar cada columna aplicando los pesos normalizados asignados a cada subcriterio (v_{ij}).

Tabla 27. Ponderación del ideal positivo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Pesos
	Compost	Bio	CDR	Inc	
Implementación	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Robustez	0,001	0,001	0,003	0,000	0,055
Capacidad de ampliación	0,003	0,001	0,003	0,000	0,055
Especialización	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Adaptabilidad	0,003	0,001	0,003	0,000	0,055
Ceptación social	0,000	0,001	0,001	0,003	0,055
Compatibilidad/flexibilidad política	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Facilidad del emplazamiento	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Empleo	0,000	0,001	0,003	0,003	0,055
Vulnerabilidad de molestias	0,003	0,001	0,000	0,001	0,055
Coste de construcción	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Coste de operación	0,000	0,001	0,001	0,003	0,055
Rentabilidad económica	0,001	0,001	0,003	0,000	0,055
Viabilidad financiera	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Emisiones contaminantes	0,000	0,000	0,003	0,003	0,055
Riesgo biológico	0,000	0,001	0,000	0,000	0,055
Ócupación de suelo	0,003	0,001	0,000	0,000	0,055
Recuperación/eliminación de RSU	0,003	0,000	0,000	0,000	0,055

Tabla 28. Ponderación del ideal negativo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Pesos
	Compost	Bio	CDR	Inc	
Implementación	0,003	0,003	0,000	0,000	0,055
Robustez	0,001	0,001	0,000	0,003	0,055
Capacidad de ampliación	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Especialización	0,003	0,000	0,001	0,000	0,055
Adaptabilidad	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Ceptación social	0,003	0,001	0,001	0,000	0,055
Compatibilidad/flexibilidad política	0,001	0,003	0,000	0,000	0,055
Facilidad del emplazamiento	0,001	0,003	0,000	0,000	0,055
Empleo	0,003	0,001	0,000	0,000	0,055
Vulnerabilidad de molestias	0,000	0,001	0,003	0,001	0,055
Coste de construcción	0,002	0,001	0,003	0,000	0,055
Coste de operación	0,003	0,001	0,001	0,000	0,055
Rentabilidad económica	0,001	0,001	0,000	0,003	0,055
Viabilidad financiera	0,003	0,001	0,000	0,000	0,055
Emisiones contaminantes	0,001	0,003	0,000	0,000	0,055
Ócupación de suelo	0,003	0,003	0,000	0,000	0,055
Recuperación de materiales	0,000	0,001	0,002	0,003	0,055
Eliminación de residuos	0,000	0,003	0,003	0,003	0,055

Finalmente, se calcula la distancia euclídea de cada alternativa.

Tabla 29. Sumatorio de las distancias al ideal positivo y negativo del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Compost	Bio	CDR	Inc
D*	0,134	0,100	0,160	0,176
D-	0,169	0,166	0,124	0,138

Tabla 30. Resultado del análisis TOPSIS para las tecnologías. Fuente: elaboración propia.

	Compost	Bio	CDR	Inc
C*	0,558	0,623	0,435	0,438

Como se puede apreciar, la tecnología más adecuada para las instalaciones de valorización es la **biometanización**, seguida del **compostaje**.

CONCLUSIÓN

En la práctica, no todos los criterios influyen de igual manera en la viabilidad de una alternativa. Determinados factores, como el riesgo ambiental o los costes de operación, suelen tener un impacto significativamente mayor en la toma de decisiones que otros como, por ejemplo, la ocupación del suelo. No obstante, la presentación inicial de resultados bajo el escenario base permite comprender con mayor

claridad el funcionamiento de la metodología TOPSIS aplicada, así como las diferencias entre las alternativas evaluadas tanto en términos de localización como de tecnología.

En lo que respecta a las alternativas de emplazamiento, se observa una diferencia sustancial entre las opciones mejor valoradas, **Alternativa 4 (Orihuela – La Ermita)** y Alternativa 1 (Albatera), y las menos favorables —Alternativas 2 y 3—. Por su parte, en el análisis tecnológico, la **biometanización** se posiciona como la opción más eficiente y adecuada para la valorización de residuos sólidos urbanos, seguida del compostaje, que también representa una alternativa viable en determinados escenarios.

4.7.2. Aplicación del modelo Montecarlo.

Una vez definidas y evaluadas las distintas alternativas conforme a los criterios y subcriterios establecidos en el análisis, el siguiente paso consiste en describir el modelo de aplicación adoptado y proceder a la asignación de los pesos relativos a cada criterio, en función de su relevancia dentro del proceso de toma de decisiones.

Para evitar el componente subjetivo, en el presente estudio se ha optado por emplear el **método de simulación de Montecarlo**, una técnica estadística que permite generar múltiples combinaciones de ponderaciones posibles a través de la asignación aleatoria de valores según distribuciones de probabilidad predefinidas. Este enfoque permite capturar una visión más robusta, objetiva y generalizable del problema, evaluando la sensibilidad del ranking final frente a diferentes escenarios de ponderación y reflejando con mayor precisión la relevancia que tienen determinados aspectos (técnicos, ambientales, sociales o económicos) frente a otros dentro del modelo multicriterio.

A continuación, se exponen los fundamentos teóricos que sustentan el método de Montecarlo, junto con sus ventajas más destacables.

El método de Montecarlo es una técnica numérica ampliamente utilizada para resolver problemas complejos cuya solución exacta es difícil o imposible de obtener. Su fundamento reside en realizar simulaciones repetidas de un modelo utilizando valores de entrada aleatorios, dentro de unos rangos definidos por funciones de distribución (uniformes, normales, triangulares, etc.). A partir de estas simulaciones, es posible analizar la variabilidad de los resultados, identificar patrones de comportamiento y estimar probabilidades asociadas a determinadas soluciones.

Para la implementación del método se ha empleado el complemento *Risk* en hoja de cálculo, el cual permite incorporar funciones estadísticas específicas. A cada criterio se le ha asignado una distribución uniforme dentro de un rango de valores técnicamente justificados, garantizando que la suma total de los pesos asignados en cada simulación sea igual a uno.

En el contexto del análisis multicriterio, el método Montecarlo permite:

1. Asignación de pesos a los criterios mediante funciones de distribución adecuadas que representen distintos escenarios realistas. En el caso del Plan Zonal de la Vega Baja, se ha optado

por utilizar distribuciones triangulares para los subcriterios de localización y tecnología, dada su simplicidad operativa, ya que se definen únicamente mediante tres parámetros: valor mínimo, valor más probable y valor máximo.

- El **valor mínimo** (m) es el límite inferior posible del rango. Es decir, representa el valor más bajo que puede tomar el peso del criterio según el juicio o evidencia técnica disponible.
- El **valor más probable** (P) es el valor más representativo o esperable dentro del rango. Se considera el valor que se estima con mayor certeza o que tiene mayor probabilidad de ocurrir en condiciones normales.
- El **valor máximo** (M) es el límite superior posible del rango. Es decir, representa el valor máximo que podría alcanzar el peso del criterio.

ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN

En el caso de la localización, al estar definidos **11** subcriterios, el valor más probable (P) se ha calculado dividiendo la unidad entre el número total de subcriterios, resultando en un valor de **P = 0,09**. El valor mínimo (m) se ha fijado en **0**, mientras que el valor máximo (M) se ha establecido como el doble del valor más probable, es decir, **M = 0,18**. De este modo, y tal como se muestra en la Figura X, se representan gráficamente los distintos valores que pueden adoptar aleatoriamente los 11 subcriterios al aplicar la simulación de Montecarlo.

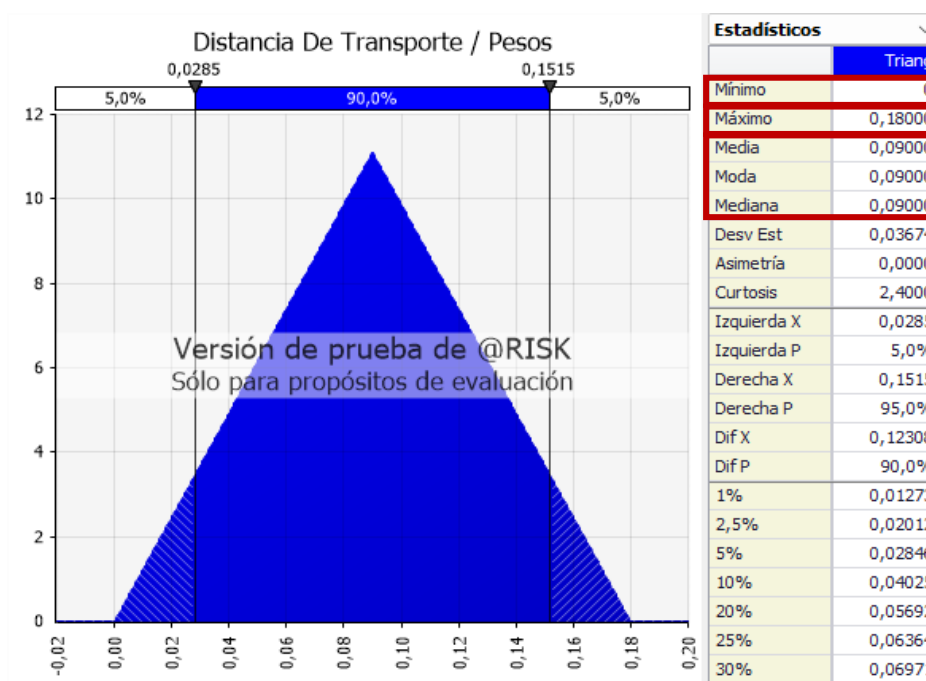


Figura 53. Distribución triangular aplicada a los pesos asignados a los subcriterios de localización. Fuente: Hoja de cálculo, @Risk.

ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍA

Siguiendo el mismo procedimiento aplicado en el caso de las alternativas de localización, para los **18** subcriterios correspondientes a las alternativas tecnológicas se definen los siguientes parámetros de la distribución triangular: valor mínimo, **m = 0**; valor más probable, **P=0,055** y valor máximo **M=0,11**. La Figura X muestra gráficamente la variabilidad de los pesos asignados aleatoriamente mediante simulación Montecarlo.

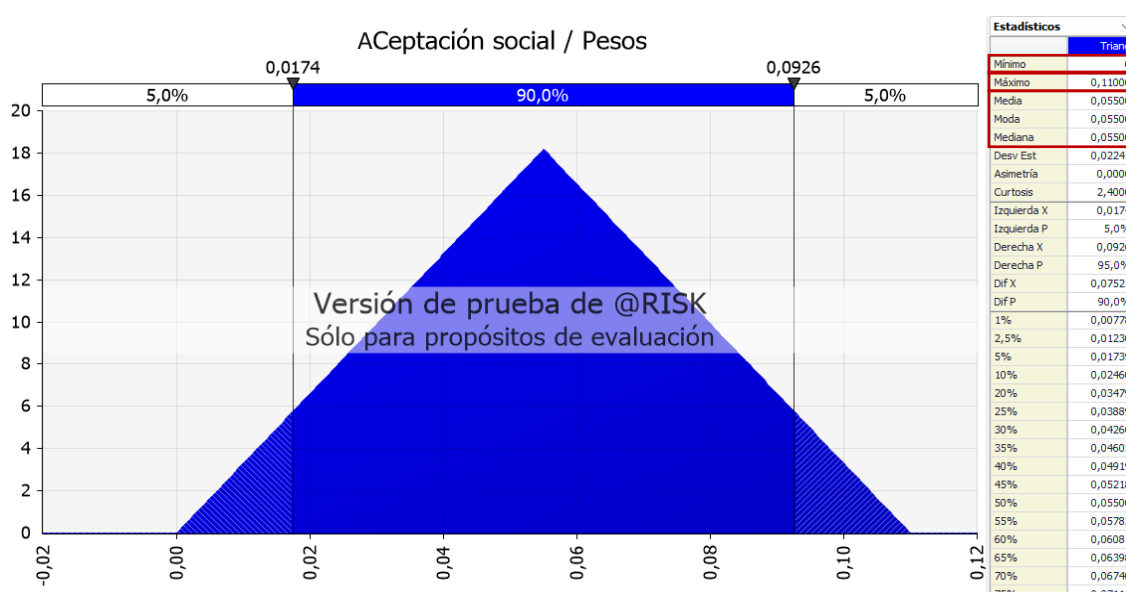


Figura 54. Distribución triangular aplicada a los pesos asignados a los subcriterios de tecnología. Fuente: Hoja de cálculo, @Risk.

2. Simular miles de iteraciones, cada una con un conjunto diferente de ponderaciones. Para ambas alternativas el número de iteraciones realizadas se ha fijado en **10.000**, asegurando una cobertura estadística suficiente para obtener resultados robustos y fiables.

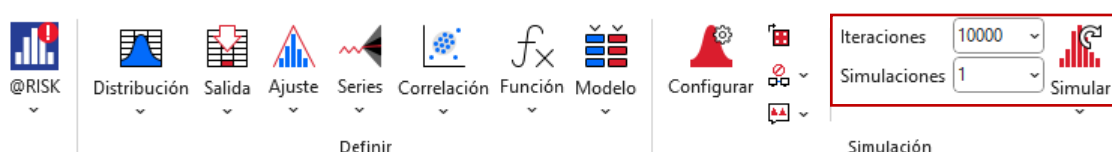


Figura 55. Interfaz de simulación en @Risk: barra de herramientas, opciones de visualización y configuración del número de iteraciones. Fuente: Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

3. Evaluar la estabilidad del ranking de alternativas a lo largo de todas las simulaciones. Ya que en cada iteración:
 - Se generan aleatoriamente nuevos pesos para los criterios.
 - Se aplica el método TOPSIS con los nuevos pesos sobre la matriz de decisiones normalizada.
 - Se obtiene una nueva clasificación de alternativas.

- Se almacena el ranking y se calcula la frecuencia de aparición de cada alternativa en primera posición.

ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN

En la [Tabla 31](#) se recoge la frecuencia con la que cada alternativa resulta seleccionada como óptima a lo largo de las 10.000 simulaciones realizadas. La Alternativa 4 destaca como la opción preferente, siendo la mejor clasificada en el **54 %** de los casos, seguida por la Alternativa 1, que alcanza un **43 %** de las simulaciones. En contraste, la Alternativa 3 obtiene únicamente un **4 %**, mientras que la Alternativa 2 no figura como la mejor opción en ninguna de las simulaciones, quedando completamente descartada en términos de probabilidad de elección óptima

Tabla 31. Resultado del análisis Montecarlo para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	A1	A2	A3	A4
	42,88%	0,00%	3,61%	53,51%

Si se suman los porcentajes asociados a las cuatro alternativas, el resultado total es del 100 %, lo que confirma la coherencia interna del análisis y la correcta ejecución del modelo de simulación.

A continuación, se muestra en la figura siguiente la probabilidad de que cada alternativa sea escogida en todos los escenarios de ponderación de los subcriterios.

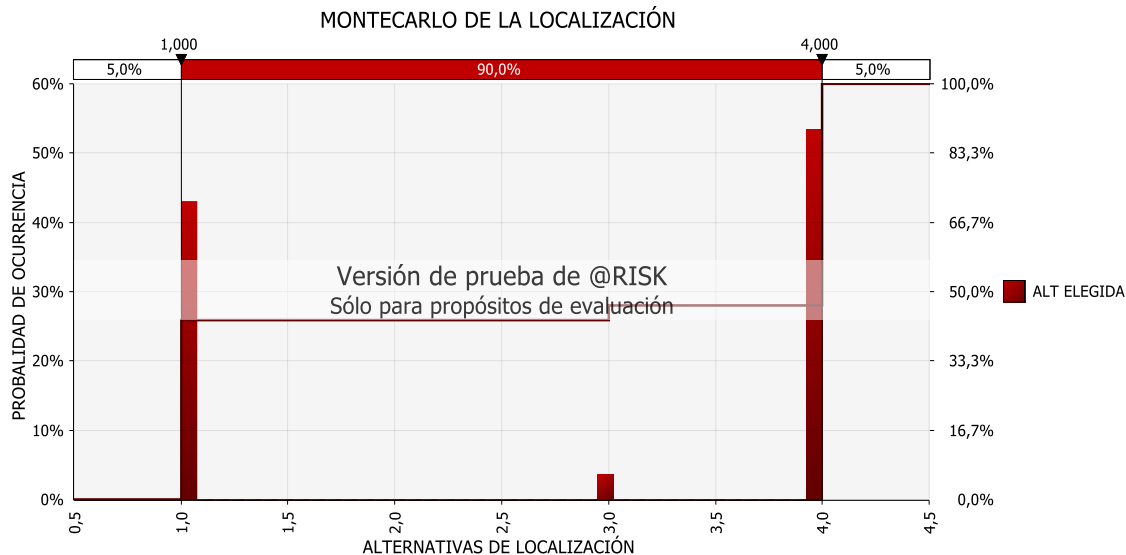


Figura 56. Umbral de sensibilidad para cada alternativa de localización. Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍA

En el caso de las alternativas tecnológicas, la biometanización (T2) se posiciona como la opción óptima en el 90 % de las simulaciones, lo que pone de manifiesto su robustez y fiabilidad frente a las demás tecnologías evaluadas.

Cabe señalar que ninguna de las tecnologías queda descartada; no obstante, tanto la producción de CDR como la incineración presentan un protagonismo comparativamente reducido en los resultados obtenidos.

Tabla 32. Resultado del análisis Montecarlo para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	T1	T2	T3	T4
	9,86%	90,09%	0,03%	0,02%

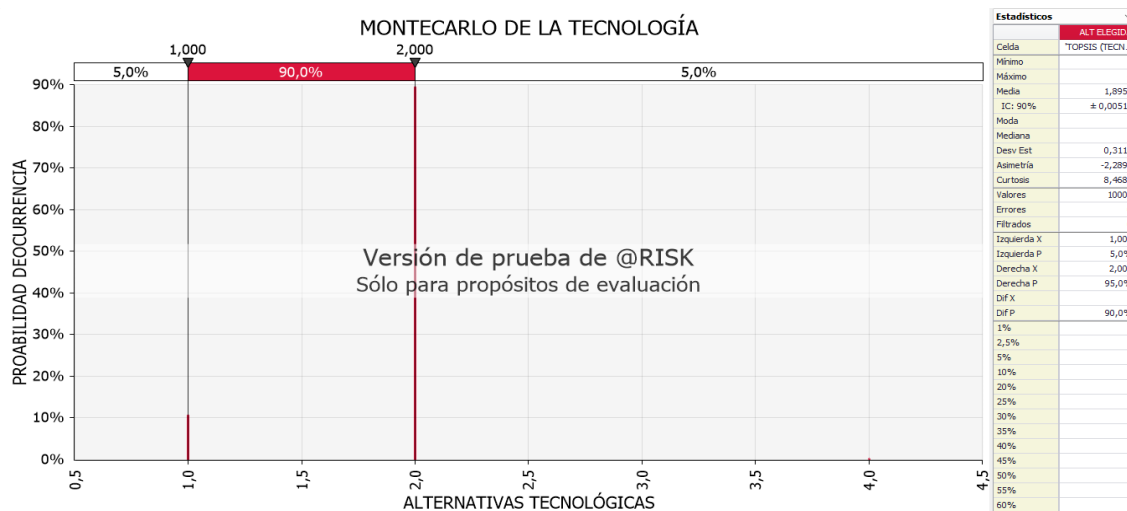


Figura 57. Probabilidad de ocurrencia para cada alternativa de tecnología. Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

- Identificar los subcriterios con mayor impacto en el resultado final. Para ello, se analiza de forma individual cómo influye la variación de cada subcriterio en la clasificación de las distintas alternativas, lo que permite determinar su relevancia en el proceso decisional. Este análisis se desarrollará con mayor profundidad en el subapartado siguiente.

4.7.3. Análisis de sensibilidad de los subcriterios

Finalmente, se presenta el análisis de sensibilidad, una fase clave dentro del proceso multicriterio que permite profundizar en la robustez de las soluciones obtenidas y, especialmente, en la identificación de los factores que ejercen mayor influencia en la selección final de alternativas. Este análisis tiene como finalidad evaluar, de manera individual, cómo la variación en el valor asignado a cada subcriterio puede alterar la clasificación de las distintas alternativas contempladas tanto para la localización como para la tecnología.

La metodología seguida consiste en modificar, dentro de su función de distribución, los valores de cada subcriterio por separado, manteniendo constantes los valores del resto. Esto permite observar, con precisión, el impacto que tiene cada subcriterio sobre el ranking final. En particular, si al variar un subcriterio en todo su rango posible no se produce ninguna modificación en la alternativa óptima, se concluye que dicho subcriterio no presenta una influencia significativa en la decisión final. Por el contrario, serán especialmente relevantes aquellos subcriterios cuya leve alteración de los pesos provoque un cambio en el resultado final de la alternativa seleccionada.

Para ilustrar el funcionamiento del análisis de sensibilidad se toma como ejemplo el subcriterio ***Distancia de transporte***, correspondiente a las alternativas de localización.

A partir de los valores mínimos (m), más probables (P) y máximos (M), previamente definidos y justificados para este subcriterio, se procede a discretizar su distribución. Para ello, se asignan manualmente valores específicos dentro del intervalo [m, M] y se ejecutan simulaciones Montecarlo en cada caso, observando cuál es la alternativa que obtiene el mayor valor del índice de proximidad relativa (C*). El resto de los subcriterios conservan su distribución probabilística.

Este procedimiento permite calcular el porcentaje de simulaciones en las que cada alternativa resulta óptima bajo distintos valores del subcriterio analizado. A modo de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos para los valores extremos del subcriterio:

- Cuando el valor del peso es **m = 0**, es decir, cuando el subcriterio de Distancia de transporte no influye en la simulación, la **Alternativa A4** resulta ser la más favorable en aproximadamente el 70 % de las iteraciones. Esto explica que, en el escenario base, A4 presente un valor de C* más próximo a 1.

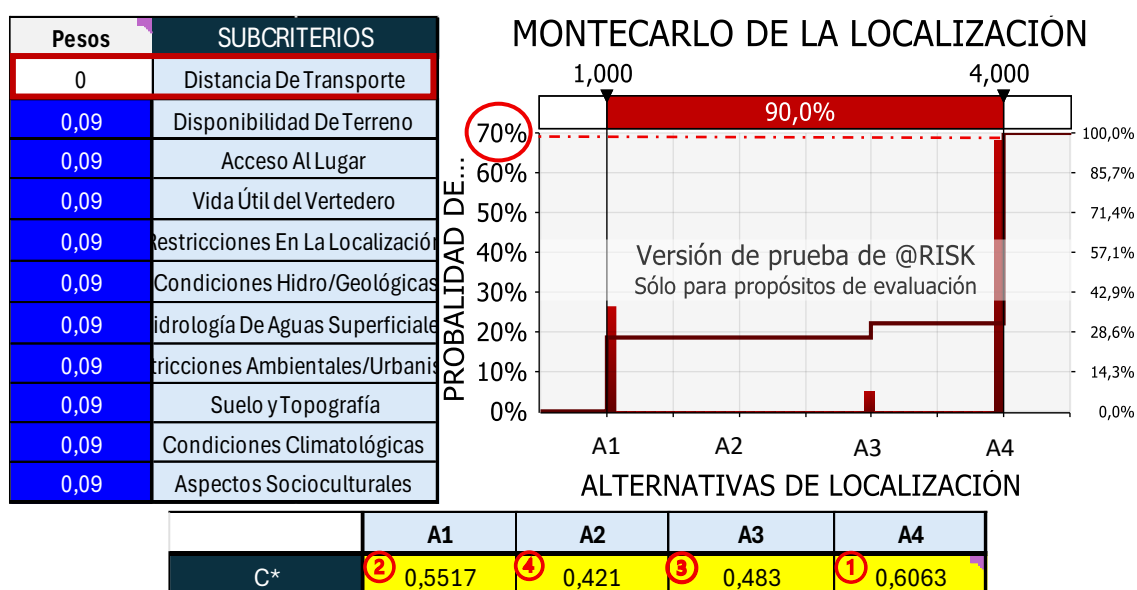


Figura 58. Probabilidad de selección de cada alternativa de localización para el peso $m = 0$ del subcriterio “Distancia de transporte”. Fuente: Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

- Cuando el valor del peso es **M = 0,18**, el análisis muestra un comportamiento opuesto: en este caso, la **Alternativa A1** se posiciona como la más idónea en alrededor del 80 % de las simulaciones. El mayor peso asignado al subcriterio penaliza a la A4 debido a su mayor distancia de transporte.

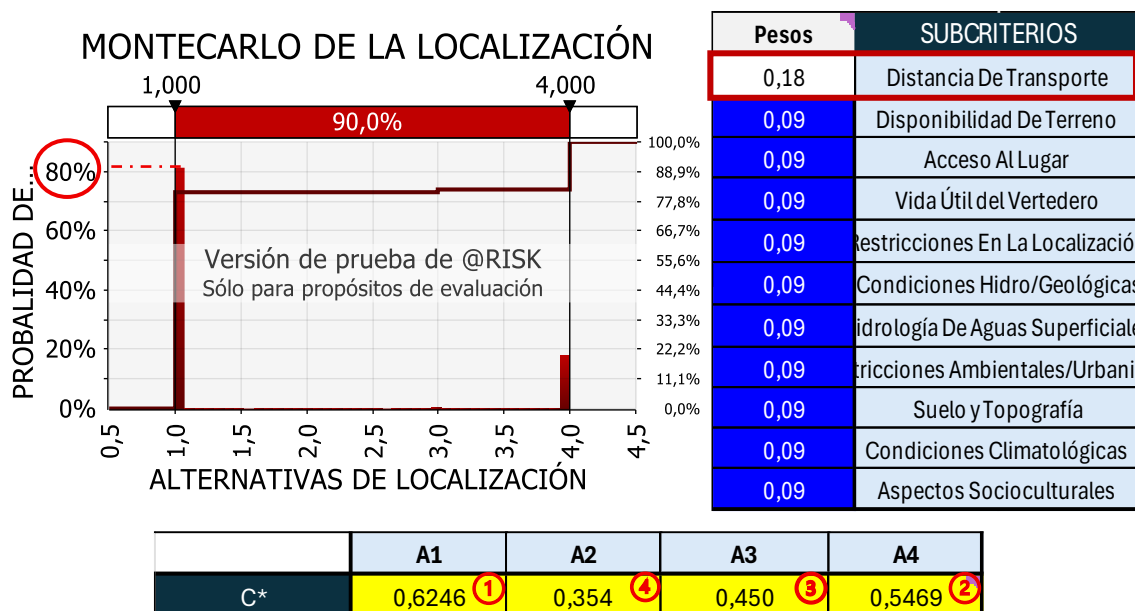


Figura 59. Probabilidad de selección de cada alternativa de localización para el peso $M = 0,18$ del subcriterio “Distancia de transporte”. Fuente: Elaboración propia a partir de hoja de cálculo con complemento @Risk.

Este patrón de comportamiento queda reflejado en una tabla de resumen, donde se muestra de forma sintetizada el orden de preferencia de las alternativas para distintos valores de peso asignado al subcriterio. Para el caso de la Distancia de transporte, se identifica un umbral crítico de cambio entre las alternativas A4 y A1 en torno al valor 0,10 – 0,11, a partir del cual se invierte la preferencia. Esto se representa también en las correspondientes **gráficas de sensibilidad**, donde se visualiza la proporción de simulaciones favorables a cada alternativa. Orden de preferencia de las alternativas según el peso asignado al subcriterio “Distancia de transporte”.

Tabla 33. Orden de preferencia de las alternativas según el peso asignado al subcriterio “Distancia de transporte”. Fuente: elaboración propia.

	Distancia De Transporte				
	ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4	
0,00	2	4	3	1	para m
0,18	1	4	3	2	para M
0,10	2	4	3	1	para X
0,11	1	4	3	2	para Y
	44,44%			55,56%	

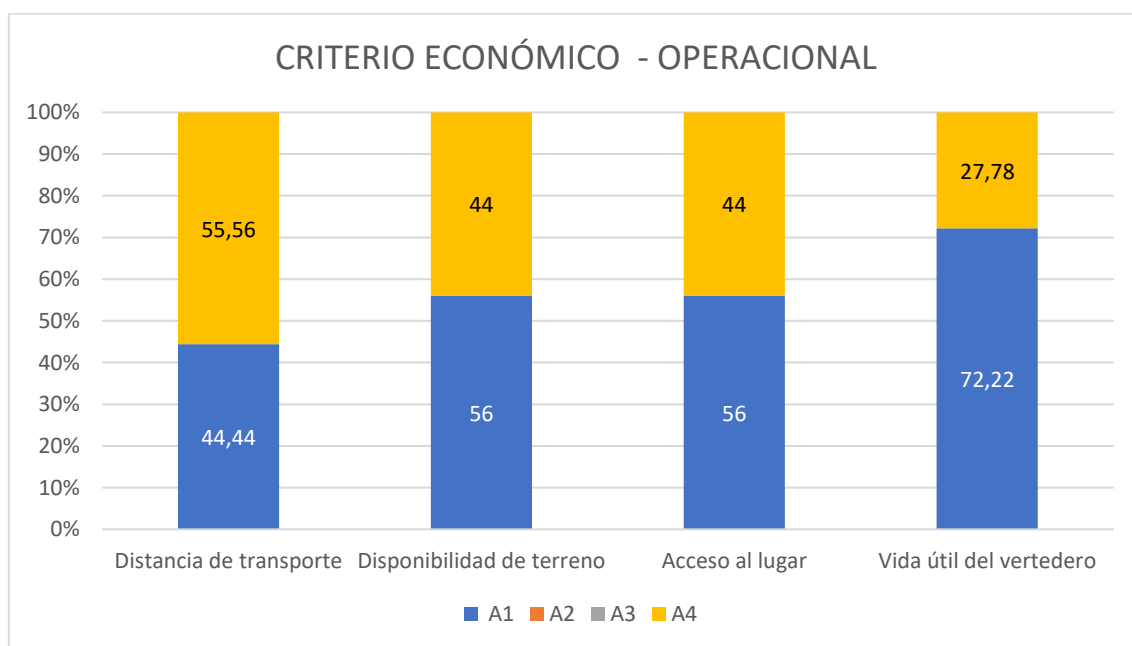
Este análisis permite estudiar de forma individual cómo varía el resultado final cuando se modifican los pesos de un subcriterio concreto, manteniendo constantes el resto de las funciones de distribución (triangulares).

Este enfoque permite no solo identificar los subcriterios más determinantes, sino también cuantificar su sensibilidad y su papel en la configuración del resultado. De este modo, se aporta un mayor grado de transparencia y comprensión del proceso decisorio, lo que resulta especialmente útil en el contexto de la planificación de infraestructuras de tratamiento de residuos sólidos urbanos, donde intervienen múltiples actores, intereses y condicionantes.

A continuación, se presentan las tablas de sensibilidad elaboradas para cada subcriterio en las dimensiones de localización y tecnología, con el fin de visualizar de manera clara los umbrales críticos a partir de los cuales se produce una variación en la alternativa óptima.

ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN

Siguiendo la metodología previamente descrita, se analiza de forma conjunta cada grupo de subcriterios asociados a un mismo criterio.



Gráfica 3. Umbrales de sensibilidad del criterio económico-operacional para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.

A partir del gráfico representado para el criterio económico-operacional, se extraen conclusiones relevantes sobre la sensibilidad de las distintas alternativas ante la variación de los pesos de los subcriterios evaluados.

En el caso del subcriterio “**Distancia de transporte**”, se aprecia que, aunque en el 56 % de las simulaciones la Alternativa 4 sigue siendo la óptima, cuando el peso de este subcriterio supera el valor de 0,10, su mayor distancia respecto a los centros de generación penaliza significativamente su rendimiento,

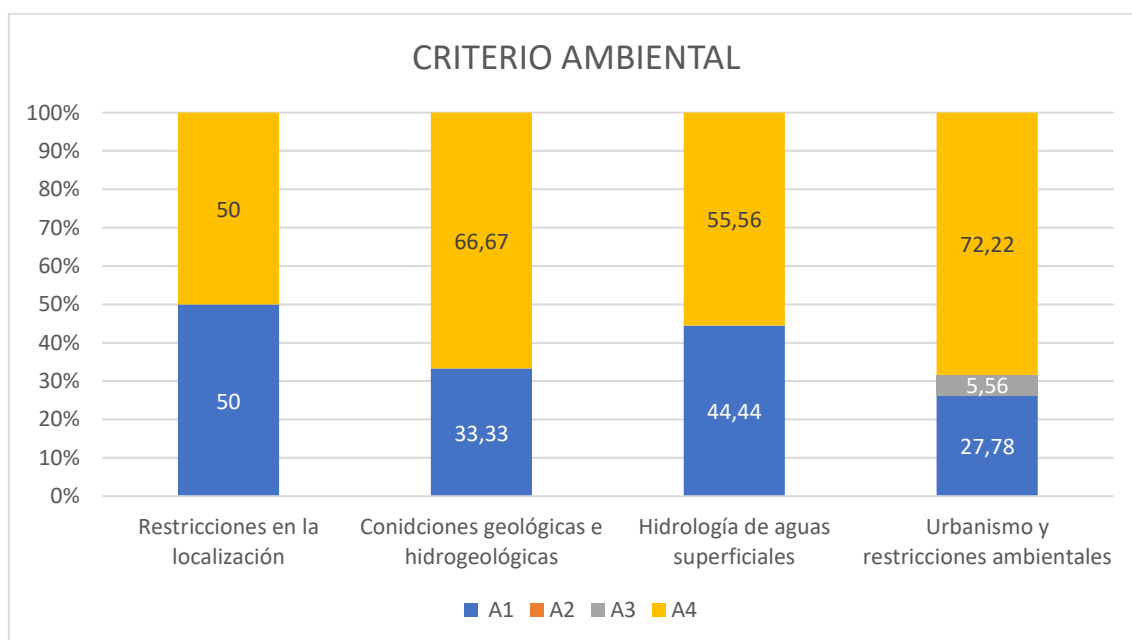
favoreciendo así a la Alternativa 1. Esto muestra que, si bien no es el subcriterio más influyente, tiene capacidad para modificar el resultado bajo ciertos escenarios.

Respecto a la “**Disponibilidad de terreno**”, se observa que a partir de un peso de 0,08 se produce un cambio en la alternativa más eficiente entre A1 y A4. Además, la Alternativa 3 mejora sustancialmente su posición cuando el peso asignado supera el valor de 0,017, debido a su mayor superficie disponible, lo que le otorga ventajas comparativas frente a las demás.

En el subcriterio “**Acceso al lugar**”, el comportamiento es prácticamente idéntico al anterior. Para valores de peso inferiores a 0,08 se favorece la Alternativa 1, mientras que con pesos superiores se impone la Alternativa 4. A partir de 0,17, la Alternativa 3 vuelve a posicionarse como segunda mejor opción, lo que demuestra su buena accesibilidad relativa.

Por último, el subcriterio “**Vida útil del vertedero**” se identifica como el menos influyente dentro de este grupo. Solo en el rango más bajo de ponderaciones (0–0,05) la Alternativa 1 consigue imponerse a la Alternativa 4, lo que sugiere que su capacidad para alterar significativamente la decisión final es limitada.

El análisis revela que los subcriterios más determinantes en el ámbito económico-operacional son la **disponibilidad de terreno** y el **acceso al lugar**, ya que muestran un mayor potencial para alterar la jerarquía entre alternativas en función del peso asignado. En cambio, la distancia de transporte y la vida útil del vertedero presentan una menor influencia, aunque en determinados rangos de peso pueden inclinar la balanza entre opciones próximas. Asimismo, desde una perspectiva global del criterio económico-operacional, la alternativa **A1** se posiciona como la opción preferente, acumulando un total de 228,66 puntos sobre un máximo de 400, lo que representa un **57 %** del total posible. Estos resultados contribuyen a identificar los factores clave que deben priorizarse en futuras evaluaciones.



Gráfica 4. Umbrales de sensibilidad del criterio ambiental para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis del gráfico correspondiente al **criterio ambiental**, se pueden extraer varias observaciones relevantes sobre el comportamiento de las distintas alternativas frente a la variabilidad de los pesos asignados a los subcriterios mediante simulación Montecarlo.

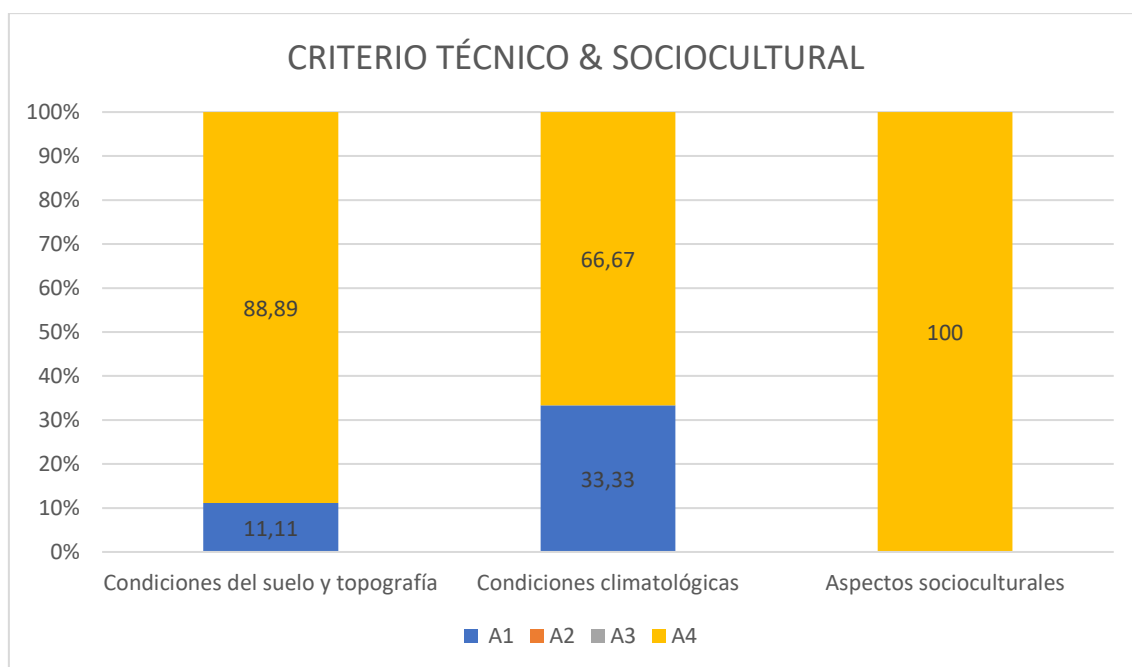
En el subcriterio **“Restricciones en la localización”**, las alternativas A1 y A4 presentan un reparto de influencia prácticamente equitativo. Esto indica que este subcriterio, aunque considerado en el análisis, no resulta decisivo en la diferenciación entre alternativas, ya que el orden de preferencia entre ellas no se altera significativamente con la variación de su peso.

Respecto a las **“Condiciones geológicas e hidrogeológicas”**, se detecta una mayor sensibilidad. La alternativa A4 es más favorable para valores bajos del subcriterio (rango 0–0,12), lo cual se debe a su mejor comportamiento frente a las características del terreno, especialmente en términos de permeabilidad. Además, a partir del valor 0,14 se produce un cambio en la jerarquía entre A2 y A3, situando a la segunda por encima, lo que sugiere que este subcriterio discrimina claramente entre opciones con comportamientos técnicos muy próximos.

En cuanto a la **“Hidrología de aguas superficiales”**, aunque existen diferencias marcadas en la distancia a masas de agua entre A1 y A4, el gráfico muestra una distribución de influencia bastante equilibrada. Esto sugiere que, en la práctica, este subcriterio tiene un peso limitado sobre el resultado final, posiblemente debido a que ninguna alternativa se encuentra en una situación crítica respecto a este factor.

Por último, en el subcriterio **“Urbanismo y restricciones ambientales”**, se observa una mayor dispersión entre alternativas. La alternativa A4 domina en el intervalo bajo de la función (hasta 0,13), pero A1 y A3 también adquieren relevancia en los tramos superiores. Esta distribución más repartida implica que este subcriterio tiene un mayor impacto relativo en el análisis multicriterio, al ser capaz de modificar el orden de las alternativas en función del peso que se le asigne.

El criterio ambiental presenta una influencia moderada dentro del modelo de decisión, si bien destaca por la relevancia de dos subcriterios particularmente sensibles: **“Condiciones geológicas e hidrogeológicas”** y **“Urbanismo y restricciones ambientales”**. Estos factores resultan especialmente diferenciadores entre alternativas, subrayando la necesidad de realizar una evaluación rigurosa del terreno y del marco normativo urbanístico en la planificación de infraestructuras de gestión de residuos. En términos globales, la alternativa **A4** se configura como la más favorable dentro de este criterio, al alcanzar 244,45 puntos sobre un total de 400, lo que equivale al **61,11 %** del valor máximo posible.



Gráfica 5. Umbrales de sensibilidad del criterios técnico y sociocultural para las alternativas de localización. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis del gráfico correspondiente al criterio **técnico y sociocultural**, se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre la influencia de cada subcriterio en la selección de la alternativa óptima:

En el subcriterio “**Condiciones del suelo y topografía**”, la alternativa A4 domina el rango de ponderación (0,03–0,18) debido a su pendiente más favorable. Aunque este subcriterio no presenta una elevada capacidad de discriminación en el análisis multicriterio global, sí refleja una ventaja técnica importante en cuanto a vulnerabilidad ambiental, que conviene considerar en la planificación final del emplazamiento.

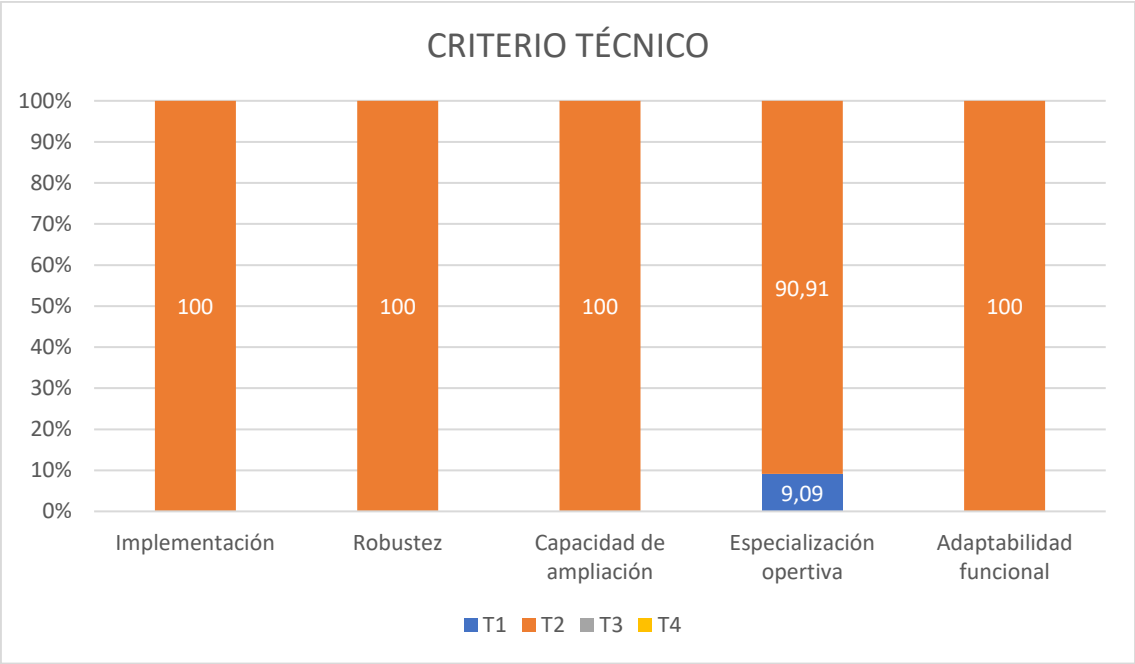
El subcriterio “**Condiciones climatológicas**” muestra una mayor sensibilidad. La alternativa A4 sigue siendo predominante, acaparando un 66,67 % del rango de ponderaciones (entre 0,07 y 0,18), lo que indica una influencia moderada en el modelo. La ventaja se debe probablemente a un mejor comportamiento en cuanto a precipitación media anual, vientos dominantes u otras variables climáticas que afectan al diseño y operación de infraestructuras ambientales.

Respecto al subcriterio “**Aspectos socioculturales**”, la alternativa A4 presenta el 100 % de incidencia positiva en la función de distribución, lo que significa que siempre es la opción preferente, independientemente del peso asignado. Esta uniformidad le resta capacidad de discriminación en el análisis, por lo que su influencia final es nula desde el punto de vista de sensibilidad. No obstante, se identifican ligeros cambios en la jerarquía entre A2 y A3 en valores extremos, lo que sugiere que estos subcriterios podrían tener utilidad complementaria en fases de evaluación social o procesos participativos.

El conjunto de subcriterios técnico y sociocultural aporta un valor limitado en la diferenciación entre alternativas, salvo en el caso de las condiciones climatológicas, que muestra una contribución más significativa. La alternativa **A4** se impone de manera clara en un **77,78%** y **100%** respectivamente, lo que refuerza su idoneidad en este bloque temático. Esta estabilidad aporta robustez a la decisión y simplifica la priorización técnica desde una perspectiva territorial y de aceptación social.

ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍA

Siguiendo la misma metodología se analizan los subcriterios asociados a las alternativas tecnológicas.



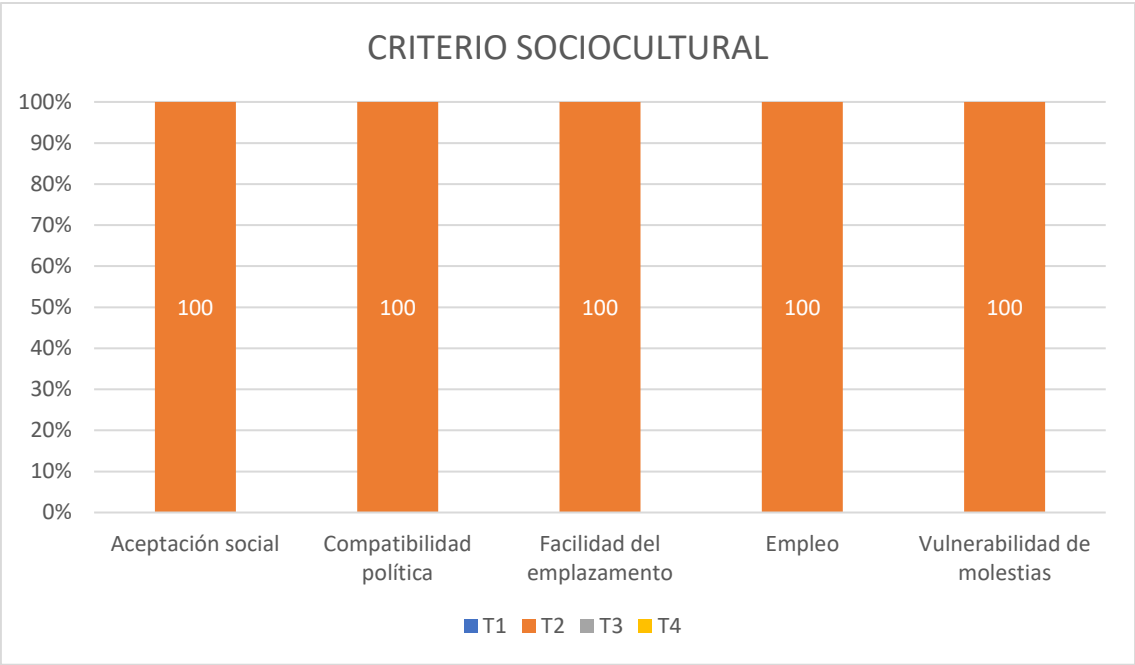
Gráfica 6. Umbrales de sensibilidad del criterio técnico para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.

El gráfico correspondiente al criterio **técnico** refleja la influencia de los cinco subcriterios evaluados (implementación, robustez, capacidad de ampliación, especialización operativa y adaptabilidad funcional) sobre la selección de la tecnología más adecuada para el tratamiento de residuos sólidos urbanos.

En primer lugar, los subcriterios de implementación, **robustez** tecnológica, capacidad de **ampliación** y **adaptabilidad** funcional presentan distribuciones altamente homogéneas. En todos ellos, la alternativa T2 (biometanización) se mantiene como la opción más ventajosa a lo largo del 100 % del rango de la función triangular de ponderación. Esto sugiere que, independientemente del peso asignado, estos subcriterios no alteran el orden de preferencia global, por lo que su influencia en el análisis multicriterio es limitada. No obstante, se observa que en los subcriterios de implementación y robustez, la tecnología T3 (CDR) supera puntualmente a la T4 (incineración) para los valores más altos de la función (aproximadamente entre 0,07 y 0,11), lo que evidencia un comportamiento secundario relevante entre alternativas con menor puntuación.

El único subcriterio que muestra una capacidad diferenciadora significativa es el de nivel de **especialización** operativa. Aunque T2 sigue siendo mayoritariamente la opción preferente, T1 (compostaje) se posiciona como la mejor tecnología en el 9,09 % de las simulaciones, especialmente cuando el peso asignado al subcriterio supera el valor de 0,10. Este resultado refleja que, en escenarios donde se da una alta importancia a la sencillez operativa y a la menor exigencia técnica, el compostaje puede adquirir una ventaja relativa frente a la biometanización.

El análisis demuestra que, dentro del criterio técnico, el subcriterio de especialización operativa es el más influyente y el único que introduce variabilidad real en los resultados finales del modelo. El resto de los subcriterios, aunque relevantes en la caracterización técnica de las tecnologías, no alteran el orden de preferencia establecido, lo que sugiere que su impacto en la decisión global es menor. Esta información resulta útil para focalizar los esfuerzos analíticos y estratégicos en aquellos factores que verdaderamente condicionan la elección tecnológica.



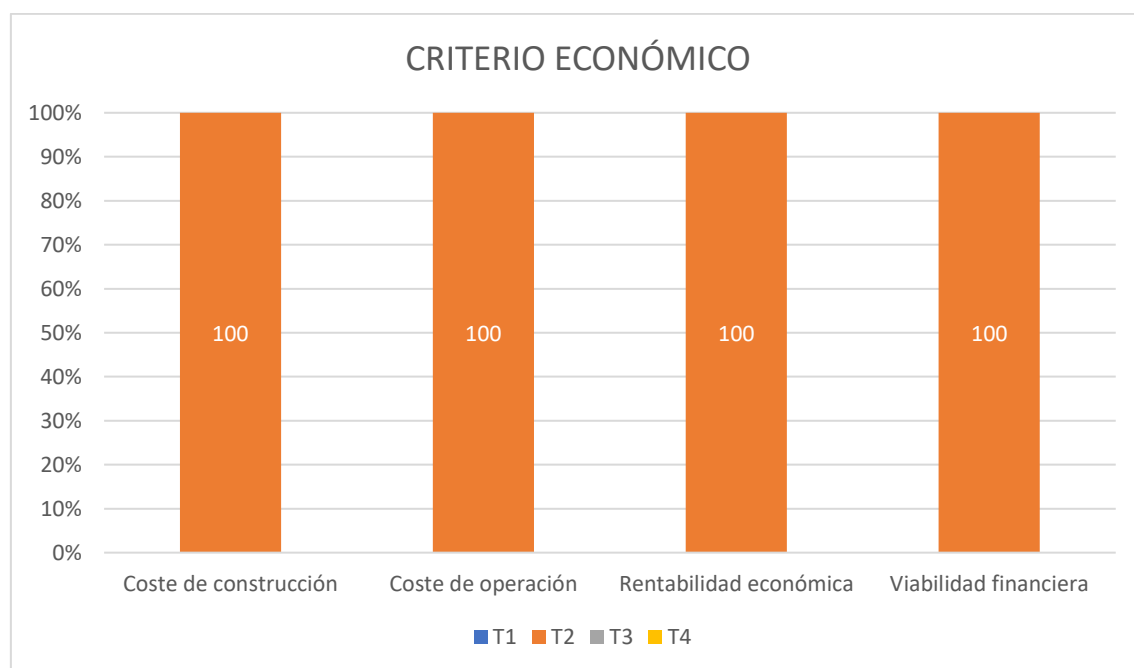
Gráfica 7. Umbrales de sensibilidad del criterio sociocultural para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.

El gráfico correspondiente al criterio **sociocultural** permite evaluar el grado de influencia de cinco subcriterios fundamentales en la elección tecnológica: aceptación social, compatibilidad política, facilidad de emplazamiento, generación de empleo y vulnerabilidad ante molestias.

En todos los casos analizados, la distribución de resultados es prácticamente invariable, lo que indica que estos subcriterios no ejercen una influencia determinante sobre la clasificación final de las tecnologías a lo largo de las simulaciones del modelo Montecarlo.

Concretamente, los subcriterios de **aceptación social**, **empleo** y **vulnerabilidad** ante **molestias** mantienen constantes las posiciones relativas de las alternativas en todo el rango de la función triangular de ponderación, lo que evidencia una contribución escasa o nula a la variabilidad del resultado final. De igual modo, los subcriterios de compatibilidad política y facilidad de emplazamiento presentan un comportamiento muy similar, con la única excepción de un leve intercambio de posición entre T3 (CDR) y T4 (incineración) a partir de valores superiores a 0,06, sin que este cambio tenga un efecto relevante en la opción tecnológica dominante.

En términos de impacto sobre la decisión multicriterio, los subcriterios del criterio socioeconómico muestran una escasa capacidad discriminadora entre las tecnologías analizadas. A excepción de variaciones marginales entre opciones de menor puntuación, las cinco tecnologías mantienen su posición relativa sin importar los pesos asignados. Esta evidencia sugiere que, para el caso específico analizado, el componente socioeconómico aporta poco valor explicativo al modelo de decisión, debiendo priorizarse otros criterios más influyentes como el técnico o el ambiental.



Gráfica 8. Umbrales de sensibilidad del criterio económico para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.

El gráfico correspondiente al criterio económico permite examinar la influencia de cuatro subcriterios esenciales en la elección tecnológica: coste de construcción, coste de operación, rentabilidad económica y viabilidad financiera a largo plazo.

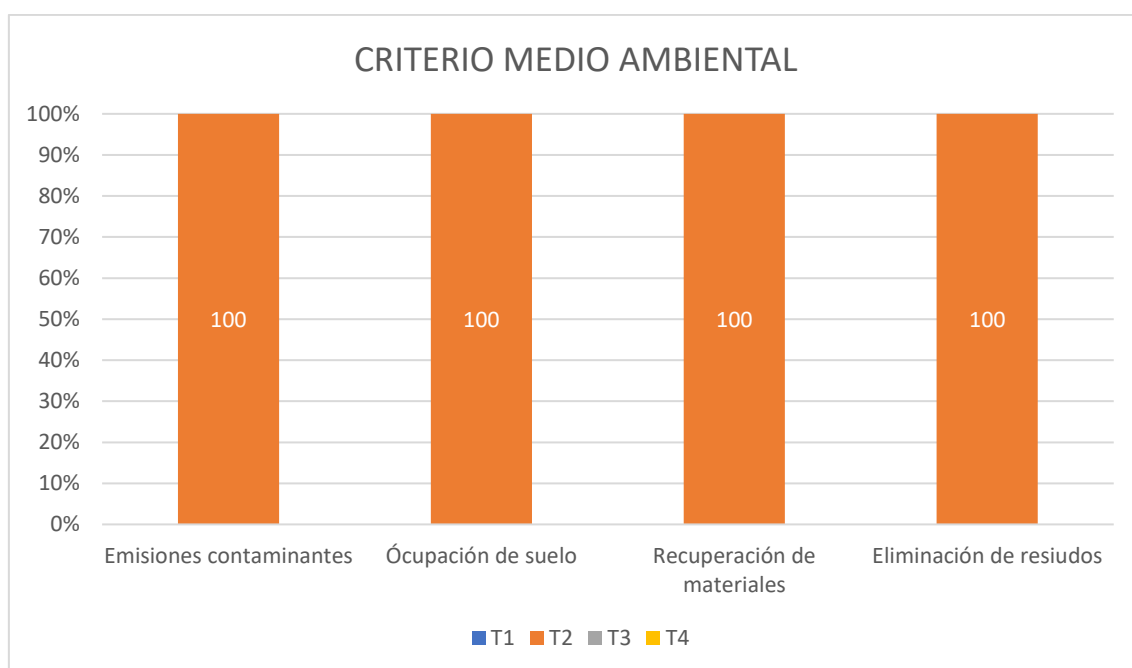
En general, la tecnología T2 (biometanización) mantiene una posición dominante en todos los subcriterios del criterio económico, lo cual refuerza su valoración global como la opción más robusta desde un punto de vista financiero y operativo. Esta estabilidad en las simulaciones de Montecarlo indica que T2 es

consistentemente la más eficiente en términos económicos, independientemente del peso asignado a cada subcriterio.

En los casos de **coste de operación** y **rentabilidad económica**, la configuración de las funciones de ponderación no altera en ningún momento el orden relativo de las tecnologías, lo que evidencia que estos subcriterios no generan variaciones significativas en los resultados finales del modelo. Ambos pueden considerarse altamente consistentes y poco sensibles a cambios en las condiciones del análisis.

Por otro lado, en los subcriterios de **coste de construcción** y **viabilidad financiera**, si bien T2 conserva su liderazgo en el 100 % de las simulaciones, se observa un intercambio de posiciones entre T3 (CDR) y T4 (incineración) a partir de ciertos umbrales de ponderación (en torno a 0,055). Este fenómeno se explica por el menor CAPEX asociado al CDR frente a la incineración, lo cual incrementa su competitividad relativa cuando el peso de estos subcriterios se eleva.

El criterio económico en su conjunto refuerza la solidez de la opción tecnológica T2, que se mantiene como la alternativa más favorable en términos financieros y operativos. Aunque la sensibilidad de ciertos subcriterios permite ligeros cambios entre tecnologías secundarias (T3 y T4), el análisis confirma que la biometanización posee una ventaja clara y estable, especialmente en costes de operación y rentabilidad, lo que la convierte en la opción tecnológicamente más rentable y fiable para el tratamiento de residuos sólidos urbanos.



Gráfica 9. Umbrales de sensibilidad del criterio medio ambiental para las alternativas de tecnología. Fuente: elaboración propia.

El gráfico correspondiente al criterio medioambiental revela la estabilidad general de los resultados del análisis multicriterio para las diferentes tecnologías, reflejando una baja sensibilidad a las variaciones en

el peso asignado a los subcriterios evaluados. Esto sugiere una alta robustez del modelo frente a estas variables.

En particular, el subcriterio de **emisiones contaminantes** muestra que todas las simulaciones dan como resultado la misma clasificación de las tecnologías, manteniéndose T2 (biometanización) como la opción más favorable. Esta estabilidad indica que el subcriterio tiene poca capacidad discriminativa en este caso concreto, al no alterar el orden relativo de las alternativas.

Lo mismo ocurre con los subcriterios de **ocupación de suelo** y **recuperación de materiales**, cuyos resultados permanecen invariables en todo el rango de valores de la función triangular, confirmando así que su influencia en el ranking final es prácticamente nula en el contexto del análisis aplicado.

En cuanto al subcriterio de **eliminación de residuos**, aunque T2 vuelve a posicionarse como la alternativa óptima en el 100 % de las simulaciones, se observa una leve variación en la clasificación de las tecnologías secundarias. A partir de un valor de ponderación de 0,08, T3 (CDR) supera a T4 (incineración), aunque T1 (compostaje) se mantiene como la segunda opción más consistente. A pesar de esta pequeña fluctuación, el subcriterio continúa mostrando un comportamiento muy robusto.

El análisis de los subcriterios medioambientales demuestra una alta estabilidad en los resultados y una baja sensibilidad del modelo ante cambios en los pesos asignados. La tecnología de biometanización (T2) se confirma como la opción medioambientalmente más favorable en todos los escenarios analizados. Aunque ciertos cambios marginales pueden observarse entre tecnologías secundarias (especialmente entre CDR e incineración), en conjunto se concluye que **los subcriterios ambientales no generan grandes variaciones en la clasificación final**, lo que refuerza la solidez del modelo en esta dimensión.

4.7.4. Conclusión

Esta secuencia permite validar los resultados obtenidos y garantiza la transparencia y trazabilidad del proceso decisional, aspectos fundamentales en el diseño de estrategias de planificación sostenibles y fundamentadas.

Por todo lo comentado anteriormente, el uso del método de Montecarlo en la determinación de pesos presenta diversas ventajas:

- **Reducción de la subjetividad:** elimina la dependencia de juicios individuales en la asignación de importancia.
- **Reproducibilidad y transparencia:** el proceso es completamente trazable y puede replicarse en futuros estudios o contextos.
- **Evaluación de la robustez del modelo:** permite identificar si la alternativa seleccionada se mantiene constante o es sensible a pequeñas variaciones en los pesos.
- **Mejor fundamentación de la decisión final:** al analizar una amplia gama de escenarios, se obtienen conclusiones más sólidas y defendibles.

En definitiva, este procedimiento no solo mejora la calidad del análisis multicriterio, sino que también fortalece la justificación técnica de las decisiones tomadas, facilitando su aceptación por parte de los distintos actores implicados. La información obtenida en esta fase servirá de base para formular las conclusiones definitivas del estudio, evaluando tanto la coherencia del modelo como su aplicabilidad práctica.

A partir del análisis de sensibilidad realizado sobre las alternativas de localización y tecnología se puede concluir con que:

ALTERNATIVAS DE LOCALIZACIÓN

En primer lugar, **los subcriterios económico-operacionales** son los que presentan una mayor capacidad discriminante. Concretamente, destacan:

- **Distancia de transporte**, ya que pequeñas variaciones en su ponderación (especialmente a partir del valor 0,10) son capaces de modificar el orden de preferencia entre las alternativas más competitivas (A1 y A4).
- **Disponibilidad de terreno y acceso al lugar**, que comparten una función de distribución con valores decisivos situados alrededor de 0,08. Ambos permiten incluso que la alternativa A3 gane posiciones frente a A1 para ciertos rangos, lo que refleja su sensibilidad.

Estos subcriterios deben considerarse prioritarios en cualquier fase de decisión, debido a su elevada influencia sobre el resultado final. Dentro del criterio económico-operacional, la alternativa **A1 (Albatera)** se consolida como la más eficiente, destacando especialmente en los subcriterios de **distancia de transporte, acceso al lugar y vida útil del vertedero**. El análisis de sensibilidad mediante Montecarlo ha demostrado que tanto la accesibilidad como la proximidad tienen un impacto determinante en la clasificación de alternativas. Además, la buena **disponibilidad de suelo** y su fácil conexión con infraestructuras existentes hacen de A1 una opción operativamente sólida y económicamente ventajosa.

En segundo lugar, dentro del **bloque ambiental**, el subcriterio más relevante es:

- **Condiciones geológicas e hidrogeológicas**, ya que presenta cambios de jerarquía entre alternativas para variaciones moderadas en el peso (en torno al 0,12-0,14). Esto sugiere que pequeñas diferencias en la permeabilidad del terreno o en la profundidad del acuífero pueden condicionar la idoneidad de la ubicación.

En cambio, subcriterios como **hidrología superficial o restricciones ambientales** tienen una influencia más estable, aunque contribuyen al reforzamiento de A4 como mejor opción.

La alternativa **A4 (Orihuela - La Ermita)** es la mejor valorada dentro del criterio ambiental, destacando por sus favorables condiciones **geológicas e hidrogeológicas**, y su menor exposición a **restricciones urbanísticas y ambientales**. Estos dos subcriterios han resultado ser los más influyentes en el análisis, lo que indica que A4 posee un emplazamiento con menor riesgo ecológico y mejor compatibilidad

Finalmente, en el **bloque técnico y sociocultural**, el análisis muestra una menor capacidad discriminante general. Si bien **condiciones climatológicas** ofrecen cierto nivel de sensibilidad, los subcriterios como **aspectos socioculturales** o **condiciones del suelo y topografía** apenas alteran la jerarquía entre alternativas, resultando menos determinantes en la toma de decisiones.

A pesar de ello, la **alternativa A4** vuelve a posicionarse como la opción más favorable. Subcriterios como **condiciones climáticas** y **topografía** se comportaron de manera estable a lo largo de las simulaciones, pero beneficiando de forma clara a A4, principalmente por su **baja pendiente y orientación favorable**, lo que facilita tanto la instalación como la operación de las infraestructuras.

En lo que respecta al subcriterio de **aspectos socioculturales**, A4 alcanza el **100 % de preferencia**, lo que refleja una elevada **aceptación social**, un **bajo riesgo de conflictividad vecinal** y una buena **integración en el modelo de desarrollo local**. Aunque este criterio presenta menor peso relativo frente a otros, refuerza notablemente la **viabilidad social y territorial** de esta ubicación.

En conclusión, los subcriterios a los que debe prestarse especial atención en la ponderación de los pesos son:

- **Distancia de transporte,**
- **Disponibilidad de terreno,**
- **Acceso al lugar,**
- **Condiciones geológicas e hidrogeológicas.**

Su influencia comprobada en el modelo de decisión y su sensibilidad ante pequeñas variaciones justifican una consideración prioritaria en el diseño y evaluación de proyectos de gestión de residuos sólidos urbanos. Estos factores no solo condicionan la eficiencia operativa, sino que también determinan la viabilidad territorial y ambiental a largo plazo.

ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍA

En términos generales, los resultados reflejan una alta robustez del modelo, ya que en la mayoría de los subcriterios el orden de preferencia entre alternativas permanece inalterado a lo largo del rango de variación de las ponderaciones. No obstante, algunos subcriterios presentan una capacidad discriminatoria relevante y, por tanto, deben ser objeto de especial atención en futuras aplicaciones del modelo o en procesos de toma de decisiones similares.

Entre los subcriterios técnicos, el único que ha mostrado una influencia significativa es el de **nivel de especialización operativa**, donde la tecnología **T1** (compostaje) alcanza la mejor posición en algunos escenarios, desplazando a **T2** (biometanización). Este comportamiento pone de manifiesto que, en contextos con limitaciones en la cualificación técnica del personal, el compostaje puede convertirse en una alternativa prioritaria.

En cuanto a los criterios económicos, destacan especialmente dos subcriterios:

- **Coste de construcción**, en el cual las tecnologías T3 (CDR) y T4 (incineración) invierten su posición relativa a partir de determinados valores de ponderación. Esto indica que el capital inicial requerido tiene una influencia significativa en el modelo.
- **Viabilidad financiera a largo plazo**, que muestra un comportamiento similar al anterior, y refuerza la importancia de considerar la sostenibilidad económica del sistema más allá de los costes operativos inmediatos.

También en este criterio, **T2** (biometanización) es la tecnología dominante, especialmente por su favorable relación entre **costes de operación, viabilidad financiera y retorno económico**. La estabilidad de estas variables, incluso en escenarios con ponderaciones distintas, demuestra su solidez económica en el medio-largo plazo.

Por el contrario, los subcriterios asociados al criterio socioeconómico (**aceptación social, compatibilidad política, facilidad de emplazamiento, generación de empleo y vulnerabilidad ante molestias**) presentan una variación nula o muy reducida en el orden de preferencia, lo que sugiere una baja capacidad para modificar la decisión final bajo las condiciones específicas del caso analizado. Sin embargo, **T2** (biometanización) sigue destacando por su buena integración social y su uso creciente en políticas energéticas sostenibles, reforzando su imagen pública positiva

En cuanto al criterio medioambiental, aunque su relevancia técnica es indiscutible, los subcriterios analizados (**emisiones, ocupación del suelo, recuperación/eliminación de residuos**) no han mostrado sensibilidad suficiente como para alterar las posiciones de las alternativas tecnológicas, salvo pequeños ajustes entre **T3** y **T4**.

En conclusión, los subcriterios que más influyen en el resultado final del análisis son:

- **Nivel de especialización operativa (criterio técnico)**
- **Coste de construcción y viabilidad financiera a largo plazo (criterio económico)**

Estos factores deben ser cuidadosamente valorados en futuros estudios, ya que su ponderación puede modificar sustancialmente el orden de las alternativas y, por tanto, afectar la elección final de la tecnología más adecuada.

4.8. Conclusiones

El análisis multicriterio desarrollado para la selección del emplazamiento y la tecnología óptima de tratamiento de residuos sólidos urbanos en el ámbito del Plan Zonal de la Vega Baja (PZ11 – AGA6) ha seguido un enfoque sistemático y transparente, garantizando en todo momento la trazabilidad de los datos utilizados, la coherencia de las hipótesis adoptadas y la justificación técnica de cada fase metodológica.

En primer lugar, se aplicó la metodología TOPSIS bajo un escenario base, asignando ponderaciones iguales a todos los criterios y subcriterios definidos para cada alternativa. Este enfoque neutro permitió identificar, de forma preliminar, aquellas opciones que, en términos generales, presentan una mejor adecuación técnica, económica, ambiental y social. En este escenario, la **Alternativa 4 (La Ermita – Orihuela)** resultó la ubicación más idónea para la instalación, mientras que la **tecnología de biometanización** se posicionó como la opción tecnológica más eficaz. Ambos resultados se fundamentan en su elevada adaptabilidad funcional, eficiencia operativa, rentabilidad y viabilidad a largo plazo.

A continuación, se procedió a aplicar el análisis de sensibilidad mediante el método de simulación de Montecarlo, con el objetivo de evaluar la estabilidad de los resultados frente a múltiples escenarios de ponderación, más representativos de la incertidumbre inherente al proceso decisional. Las simulaciones revelaron una notable **robustez del modelo**, ya que las alternativas mejor posicionadas en el escenario base mantuvieron su liderazgo en la mayoría de los casos. En concreto, **la Alternativa 4 fue la opción óptima en más del 50 % de las simulaciones**, mientras que la **biometanización superó el 90 % de las iteraciones favorables**, consolidándose como la solución tecnológica preferente.

No obstante, el análisis de sensibilidad también permitió identificar subcriterios cuya variación puede alterar el orden de preferencia entre alternativas cercanas. En el caso de la localización, factores como **la distancia de transporte o la disponibilidad de terreno** mostraron influencia significativa, especialmente en los valores extremos de su distribución de peso. En cuanto a la tecnología, la **especialización operativa y el coste de construcción** fueron determinantes en ciertos escenarios, evidenciando la necesidad de considerar con mayor atención estos factores en contextos con limitaciones técnicas o presupuestarias.

En conclusión, la aplicación del modelo multicriterio ha permitido no solo priorizar alternativas de forma objetiva y reproducible, sino también identificar los factores clave que condicionan la decisión final. La coherencia entre los resultados del escenario base y los derivados del análisis de sensibilidad valida la **solidez metodológica del enfoque propuesto**, y refuerza la idoneidad de las soluciones seleccionadas. En definitiva, el modelo aplicado constituye una herramienta eficaz de apoyo a la planificación estratégica de infraestructuras ambientales, alineada con los principios de sostenibilidad, eficiencia y toma de decisiones informada.

5. CONCLUSIÓN

El presente Trabajo Fin de Máster ha logrado cumplir de forma íntegra y justificada los objetivos inicialmente planteados, articulando un enfoque metodológico robusto, adaptado al contexto regional de la Vega Baja y orientado a promover decisiones sostenibles en materia de gestión de residuos sólidos urbanos (RSU).

En primer lugar, se ha desarrollado y validado una propuesta metodológica basada en el método multicriterio TOPSIS, que ha demostrado ser eficaz para la evaluación comparativa de distintas alternativas de emplazamiento y tecnología de tratamiento. La estructura analítica del modelo, fundamentada en la distancia relativa a soluciones ideales, ha permitido integrar múltiples criterios técnicos, ambientales, económicos y socioculturales, manteniendo la objetividad y la trazabilidad del proceso en todas sus fases. La construcción de matrices de decisión, la normalización de los datos, la aplicación del método Montecarlo para la ponderación de pesos y el análisis de sensibilidad han constituido una secuencia metodológica coherente y reproducible.

En segundo lugar, esta metodología ha sido adaptada con éxito al caso concreto del Plan Zonal PZ11 – AGA6 de la Vega Baja, teniendo en cuenta las particularidades territoriales, normativas y operativas de la región. La caracterización detallada del ámbito de estudio, junto con la evaluación de alternativas específicas de localización y tecnología, ha permitido una aplicación realista y contextualizada del modelo propuesto. La incorporación de datos oficiales, documentación técnica y estudios sectoriales ha garantizado la solidez y la pertinencia de los resultados obtenidos.

En tercer lugar, el trabajo ha contribuido a fomentar una toma de decisiones sostenible, mediante la integración equilibrada de criterios que reflejan los pilares fundamentales de la economía circular y la planificación ambiental responsable. El análisis ha identificado la Alternativa 4 (La Ermita - Orihuela) como la opción más adecuada para la localización de la planta, y la biometanización como la tecnología óptima para el tratamiento de residuos, en coherencia con su mayor eficiencia, viabilidad financiera, aceptación social y menor impacto ambiental.

La aplicación del método TOPSIS ha demostrado notables ventajas: su facilidad de uso, la transparencia en la interpretación de los resultados, su capacidad para gestionar simultáneamente criterios de beneficio y coste, así como la obtención de un índice sintético claro que permite jerarquizar alternativas sin ambigüedad. Asimismo, su bajo requerimiento computacional y su adaptabilidad lo convierten en una herramienta ideal para entornos de decisión participativa o planificación pública.

Este trabajo aporta una metodología sólida, adaptable y técnicamente fundamentada para la planificación de infraestructuras de tratamiento de residuos, útil tanto para administraciones públicas como para entidades privadas que deseen incorporar criterios de sostenibilidad, eficiencia y participación en la toma de decisiones. La integración de análisis de sensibilidad y simulación Montecarlo ha fortalecido la robustez

de los resultados, consolidando así un marco de referencia replicable para otros contextos territoriales similares.

6. LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN

Aunque los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Máster han permitido establecer un marco metodológico robusto y una evaluación objetiva de alternativas de localización y tecnología para la gestión de residuos sólidos urbanos, se identifican diversas áreas susceptibles de mejora y profundización que permitirían refinar los análisis y aumentar la fiabilidad de las conclusiones extraídas. Entre las principales líneas de investigación futura se propone:

- Ampliar la recopilación de datos técnicos a partir de instalaciones reales existentes en contextos regionales similares al caso de estudio correspondiente, con volúmenes de tratamiento comparables, a fin de validar y ajustar los valores atribuidos a los subcriterios de evaluación (costes, ocupación, rendimiento, emisiones, etc.).
- Caracterizar con mayor precisión los residuos generados en la Vega Baja, mediante campañas específicas de muestreo y análisis fisicoquímico, con el fin de mejorar el ajuste entre los flujos de entrada y las tecnologías consideradas (biometanización, compostaje, CDR, incineración).
- Obtener información desagregada y actualizada sobre ratios reales de funcionamiento, costes operativos y eficiencia energética de las tecnologías analizadas, a partir de documentación técnica y auditorías ambientales, para refinar las escalas de valoración y reducir la incertidumbre en los modelos multicriterio.
- Complementar el análisis multicriterio basado en TOPSIS con otras técnicas de ayuda a la decisión, como PROMETHEE, VIKOR o AHP ponderado, con el fin de comparar resultados y analizar la sensibilidad del modelo frente a distintos enfoques metodológicos.
- Incorporar una valoración social más representativa basada en encuestas públicas estructuradas dirigidas a los municipios implicados, que permita asignar pesos más precisos a los subcriterios socioculturales y aumentar la legitimidad del proceso de toma de decisiones.

Estas líneas de trabajo permitirían consolidar los resultados de esta Tesis y adaptarlos aún más a la realidad operativa y normativa del territorio, fortaleciendo la aplicabilidad del modelo propuesto en procesos de planificación territorial y gestión sostenible de residuos.

7. REFERENCIAS

- [1] O. W. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. P. Minh, and N. Lyczko, "A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 8, no. 2, pp. 267–283, Mar. 01, 2017. doi: 10.1007/s12649-016-9826-4.
- [2] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, "Sistemas de tratamiento - Depósito en Vertedero," 2016. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Deposito-en-vertedero.aspx> (accessed Apr. 17, 2023).
- [3] M. Pinach Forcadell, "Diseño de vertederos de residuos sólidos urbanos: definición de los parámetros geotécnicos de cálculo de estabilidad de taludes. Aplicación al vertedero de Lorca (Murcia)," Sep. 2020. <https://riunet.upv.es/handle/10251/150543> (accessed Apr. 18, 2023).
- [4] Waga Energy, "Todo sobre el gas de vertedero - Waga Energy," 2020. <https://waga-energy.com/es/todo-sobre-el-gas-de-vertedero/> (accessed Feb. 17, 2023).
- [5] S. Martín, *Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización*. Universidad de Oviedo, Biblioteca Universitaria, 2008.
- [6] Secretaría de Estado de Medio Ambiente, "Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR)," 2016.
- [7] Generalitat Valenciana, "Plan Integral Residuos Comunidad Valenciana," 2011.
- [8] P. Suárez Romero, "Metodología para el dimensionamiento, gestión y control ambiental de vertederos de residuos sólidos urbanos - Trabajo final de máster," UPV, Valencia, 2022.
- [9] M. E. Rodrigo Clavero, "Evolución conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU - Tesis doctoral," UPV, Valencia, 2020.
- [10] E. A. SEPA, "Guidance on the management of landfill gas Landfill directive Lfd," 2004. www.environment-agency.gov.uk
- [11] Y. Camargo and A. Vélez, "Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios," Colombia-Camargo, 2009.
- [12] Wikipedia, "Metano," 2020. <https://es.wikipedia.org/wiki/Metano> (accessed May 11, 2023).
- [13] Wikipedia, "Dióxido de carbono," 2020. https://es.wikipedia.org/wiki/Dióxido_de_carbono (accessed May 11, 2023).
- [14] U.S. EPA, "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide," 2005.
- [15] A. Lecuona Ferrando, "Trabajo Fin de Máster," 2019.

- [16] J. R. Alonso, "La importancia de las fibras vegetales en la salud humana," 2000. <https://www.med-informatica.com/TERAPEUTICA-STAR/FibrasVegetales1.htm> (accessed Mar. 09, 2023).
- [17] IPCC, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste, Chapter 3: Solid Waste Disposal," 2006. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf
- [18] Zhou et al., "Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review," *Science of the Total Environment*, 2014.
- [19] Universidad Politécnica de Valencia, Riunet. *Evaluación de tecnologías de tratamiento de residuos* [PDF]. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/4ee88fad-8604-4aae-9715-eade622114f/content>
- [20] Autor Desconocido. *Documento sobre tratamiento de RSU* [PDF]. <https://chil.me/download-doc/132539>
- [21] Umweltbundesamt. *Municipal Waste Management in Germany* [Texto 40/2018]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-30_texte_40-2018-municipal-waste-management_en.pdf
- [22] Gaurav, R. et al. "Integrated municipal solid waste management." *Procedia Environmental Sciences*, vol. 37, 2016, pp. 99–108. <https://sciencedirect.com> (accessed Jun. 13, 2025).
- [23] Greenpeace España. *Contaminación por residuos: el caso CDR* [Informe]. <https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/contaminacion/cdr290512.pdf>
- [24] Fundación CEMA. *Sustitución de combustibles fósiles en sector cementero: oportunidad para reducir el vertido de residuos* [Informe], 2017. https://www.fundacioncema.org/wp-content/uploads/2017/08/ES_Sustitución-de-combustibles-fósiles-en-sector-cementero.-Oportunidad-para-reducir-el-vertido-de-residuos_F.CEMA_.pdf
- [25] MITECO. *Memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal 2021* [PDF], 2022. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgecocr/residuos-municipales/Memoria%20anual%20de%20generación%20y%20gestión%20de%20residuos.%20Residuos%20de%20Competencia%20Municipal%202021.pdf>
- [26] Consorcio Vega Baja Sostenible. *Presentación Manuel Pineda* [PDF], 2018. <https://www.consorciovegabajasostenible.com/wp-content/uploads/2018/07/Presentación-Manuel-Pineda.pdf>
- [27] Universidad Politécnica de Madrid. *Análisis de compostaje de RSU* [Tesis Doctoral]. <https://oa.upm.es/42792/>

- [28] Universidad Politécnica de Valencia, Riunet. *Evaluación de la gestión de residuos municipales* [PDF].
<https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/3d872e70-b9dc-4ff6-a434-3412e242a7dc/content>
- [29] C. L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9.

ANEJO: ANÁLISIS TOPSIS

Introducción

El propósito de este anejo es documentar de forma precisa el funcionamiento y el contenido de las hojas de cálculo empleadas en la aplicación del método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), desarrollado para seleccionar la alternativa óptima de localización y tecnología de instalaciones de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) en el ámbito del Plan Zonal PZ11 – AGA6 (Vega Baja, Alicante).

En este apartado se detallan:

- La estructura y configuración de las matrices de decisión en el análisis TOPSIS.
- La asignación de pesos mediante simulaciones de Montecarlo.
- El procedimiento del análisis de sensibilidad.
- El criterio de cálculo del índice de proximidad relativa (C^*).

Este anejo tiene por objeto reforzar la trazabilidad y reproducibilidad del modelo aplicado, garantizando la transparencia en todas las fases del análisis multicriterio.

Alternativas de localización

A continuación, se presenta la estructura general de la hoja Excel utilizada para el análisis de las alternativas de localización. Cada una de sus secciones será explicada en detalle a lo largo de este anejo.

SUBCRITERIOS	max/min	ALTERNATIVA				A* (best)	A (worst)
		A1	A2	A3	A4		
Distancia De Transporte	min	25.00	29.00	30.50	35.75	25.00	39.00
Disponibilidad De Terreno	max	2,000+01	2,400+03	2,014+03	3,181+05	3,181+05	2,000+01
Acceso Al Lugar	min	0.00	0.10	0.70	0.00	0.00	0.80
Valores de Ventas	max	4,000+08	3,500+06	3,000+06	5,000+08	5,000+08	3,500+06
Restricciones En La Localización	max	0.70	0.85	0.50	0.75	0.70	0.75
Condiciones Hidro Geológicas	min	1,000+06	1,000+06	1,000+06	1,000+06	1,000+06	1,000+06
Hidrología De Aguas Superficiales	max	11.30	2.10	3.78	4.20	11.30	2.10
Restricciones Ambientales/Antiguas	max	1.20	2.50	4.85	0.00	4.85	0.00
Condiciones Del Suelo y Topografía	min	4.00	5.00	4.80	3.00	3.00	4.00
Condiciones Climatológicas	min	279.00	300.00	275.00	260.00	260.00	300.00
Aspectos Socioculturales	min	2350	2050	2410	2010	2010.00	2410.00

ANÁLISIS TOPSIS

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL POSITIVO			
		A1	A2	A3	A4
Distancia De Transporte	min	0.000	0.000	-0.314	-0.300
Disponibilidad De Terreno	max	0.000	-0.311	-0.705	-1.000
Acceso Al Lugar	min	0.000	-0.544	-0.700	-1.000
Valores de Ventas	max	0.068	0.000	-1.000	-0.000
Restricciones En La Localización	max	-1.000	-0.034	-0.500	0.000
Condiciones Hidro Geológicas	min	0.000	-1.000	0.000	-0.641
Hidrología De Aguas Superficiales	max	0.000	0.000	-0.183	-0.233
Restricciones Ambientales/Antiguas	max	0.258	-0.518	1.000	0.000
Condiciones Climatológicas	min	-0.460	-0.333	0.000	-1.000
Aspectos Socioculturales	min	-0.911	-1.000	0.000	-1.000

SUBCRITERIOS	max/min	PONDERRACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Puntos
		A1	A2	A3	A4	
Distancia De Transporte	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Disponibilidad De Terreno	0.008	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
Acceso Al Lugar	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
Valores de Ventas	0.002	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
Restricciones En La Localización	0.000	0.008	0.001	0.008	0.000	0.000
Condiciones Hidro Geológicas	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Hidrología De Aguas Superficiales	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
Restricciones Ambientales/Antiguas	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Condiciones Del Suelo y Topografía	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000
Condiciones Climatológicas	0.003	0.008	0.002	0.000	0.000	0.000
Aspectos Socioculturales	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

SUBCRITERIOS	max/min	PONDERRACIÓN DEL IDEAL NEGATIVO				Puntos
		A1	A2	A3	A4	
Distancia De Transporte	0.008	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Disponibilidad De Terreno	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.000
Acceso Al Lugar	0.000	0.002	0.005	0.000	0.000	0.000
Valores de Ventas	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000
Restricciones En La Localización	0.008	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
Condiciones Hidro Geológicas	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000
Hidrología De Aguas Superficiales	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Restricciones Ambientales/Antiguas	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Condiciones Del Suelo y Topografía	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Condiciones Climatológicas	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Aspectos Socioculturales	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

D+	A1				A2				A3				A4			
	0.181	0.225	0.188	0.183	0.217	0.156	0.275	0.303	0.181	0.225	0.188	0.183	0.217	0.156	0.275	0.303
D-	A1				A2				A3				A4			
	0.178	0.200	0.173	0.168	0.178	0.200	0.173	0.168	0.178	0.200	0.173	0.168	0.178	0.200	0.173	0.168
	2				4				3				1			

At FLEDA
0.000

DISTANCIA EUCLIDEA

$$C_j = \frac{D_j^+}{D_j^+ + D_j^-}$$

En primer lugar, se presenta una tabla resumen con los resultados finales obtenidos para los subcriterios de cada alternativa de localización. Esta tabla refleja las soluciones ideales positiva y negativa derivadas del análisis TOPSIS, sirviendo como base para la comparación entre alternativas.

SUBCRITERIOS	max/min	ALTERNATIVAS				A ⁺ (best)	A ⁻ (worst)
		A1	A2	A3	A4		
Distancia De Transporte	min	25,90	39,90	35,50	35,70	25,90	39,90
Disponibilidad De Terreno	max	2,05E+05	2,40E+05	2,85E+05	3,18E+05	3,18E+05	2,05E+05
Acceso Al Lugar	min	6,80	3,10	1,70	0,00	0,00	6,80
Vida Útil del Vertedero	max	4,56E+06	3,51E+06	5,36E+06	5,36E+06	5,36E+06	3,51E+06
Restricciones En La Localización	max	5,70	2,85	4,50	2,75	5,70	2,75
Condiciones Hidro/Geológicas	min	5,00E-08	1,00E-08	1,39E-05	5,00E-06	1,00E-08	1,39E-05
Hidrología De Aguas Superficiales	max	11,30	2,10	3,78	4,20	11,30	2,10
Restricciones Ambientales/Urbanismo	max	1,20	2,50	4,65	0,00	4,65	0,00
Condiciones Del Suelo y Topografía	min	4,00	5,00	6,00	3,00	3,00	6,00
Condiciones Climatológicas	min	279,00	300,00	275,00	250,00	250,00	300,00
Aspectos Socioculturales	min	2350	2050	5410	2050	2050,00	5410,00

A continuación, se calcula la matriz de valores normalizados en relación con los ideales positivo y negativo. Estos valores se representan como r_{ij}^+ y r_{ij}^- , respectivamente, y permiten homogeneizar las unidades y magnitudes de los subcriterios.

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL POSITIVO			
		A1	A2	A3	A4
Distancia De Transporte	min	0,000	1,000	0,686	0,700
Disponibilidad De Terreno	max	1,000	0,689	0,295	0,000
Acceso Al Lugar	min	1,000	0,456	0,250	0,000
Vida Útil del Vertedero	max	0,431	1,000	0,000	0,000
Restricciones En La Localización	max	0,000	0,966	0,407	1,000
Condiciones Hidro/Geológicas	min	0,003	0,000	1,000	0,359
Hidrología De Aguas Superficiales	max	0,000	1,000	0,817	0,772
Restricciones Ambientales/Urbanismo	max	0,742	0,462	0,000	1,000
Condiciones Del Suelo y Topografía	min	0,333	0,667	1,000	0,000
Condiciones Climatológicas	min	0,580	1,000	0,500	0,000
Aspectos Socioculturales	min	0,089	0,000	1,000	0,000

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL NEGATIVO			
		A1	A2	A3	A4
Distancia De Transporte	min	-1,000	0,000	-0,314	-0,300
Disponibilidad De Terreno	max	0,000	-0,311	-0,705	-1,000
Acceso Al Lugar	min	0,000	-0,544	-0,750	-1,000
Vida Útil del Vertedero	max	-0,569	0,000	-1,000	-1,000
Restricciones En La Localización	max	-1,000	-0,034	-0,593	0,000
Condiciones Hidro/Geológicas	min	-0,997	-1,000	0,000	-0,641
Hidrología De Aguas Superficiales	max	-1,000	0,000	-0,183	-0,228
Restricciones Ambientales/Urbanismo	max	-0,258	-0,538	-1,000	0,000
Topografía	min	-0,667	-0,333	0,000	-1,000
Condiciones Climatológicas	min	-0,420	0,000	-0,500	-1,000
Aspectos Socioculturales	min	-0,911	-1,000	0,000	-1,000

En este paso, se pondera cada subcriterio aplicando los pesos normalizados previamente asignados. Esto da lugar a la matriz ponderada v_{ij} , que refleja la importancia relativa de cada criterio dentro del modelo de decisión.

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Pesos
	A1	A2	A3	A4	
Distancia De Transporte	0,000	0,008	0,004	0,004	0,090
Disponibilidad De Terreno	0,008	0,004	0,001	0,000	0,090
Acceso Al Lugar	0,008	0,002	0,001	0,000	0,090
Vida Útil del Vertedero	0,002	0,008	0,000	0,000	0,090
Restricciones En La Localización	0,000	0,008	0,001	0,008	0,090
Condiciones Hidro/Geológicas	0,000	0,000	0,008	0,001	0,090
Hidrología De Aguas Superficiales	0,000	0,008	0,005	0,005	0,090
Restricciones Ambientales/Urbanismo	0,004	0,002	0,000	0,008	0,090
Condiciones Del Suelo y Topografía	0,001	0,004	0,008	0,000	0,090
Condiciones Climatológicas	0,003	0,008	0,002	0,000	0,090
Aspectos Socioculturales	0,000	0,000	0,008	0,000	0,090

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL NEGATIVO				Pesos
	A1	A2	A3	A4	
Distancia De Transporte	0,008	0,000	0,001	0,001	0,090
Disponibilidad De Terreno	0,000	0,001	0,004	0,008	0,090
Acceso Al Lugar	0,000	0,002	0,005	0,008	0,090
Vida Útil del Vertedero	0,003	0,000	0,008	0,008	0,090
Restricciones En La Localización	0,008	0,000	0,003	0,000	0,090
Condiciones Hidro/Geológicas	0,008	0,008	0,000	0,003	0,090
Hidrología De Aguas Superficiales	0,008	0,000	0,000	0,000	0,090
Restricciones Ambientales/Urbanismo	0,001	0,002	0,008	0,000	0,090
Suelo y Topografía	0,004	0,001	0,000	0,008	0,090
Condiciones Climatológicas	0,001	0,000	0,002	0,008	0,090
Aspectos Socioculturales	0,007	0,008	0,000	0,008	0,090

A partir de la matriz ponderada, se calcula la distancia euclídea de cada alternativa respecto al ideal positivo (D^+) y al ideal negativo (D^-). Estas distancias permiten valorar la cercanía de cada opción a la solución óptima y su alejamiento respecto a la peor solución posible.

	A1	A2	A3	A4
D+	0,161	0,225	0,195	0,161
D-	0,217	0,150	0,175	0,230

Finalmente, se determina el índice de proximidad relativa ($C^*C^*C^*$) para cada alternativa.

	A1	A2	A3	A4
C*	0,575	0,400	0,473	0,588

Este índice permite ordenar las alternativas de mayor a menor preferencia, siendo más favorable aquella con un $C^*C^*C^*$ más próximo a 1.

A continuación, se describen los elementos de la hoja Excel vinculados con el análisis de sensibilidad mediante el método Montecarlo. En este entorno de simulación, las celdas resaltadas en azul representan las variables de entrada del modelo, es decir, los pesos asignados a cada subcriterio, los cuales son distribuidos aleatoriamente en cada iteración respetando la condición de suma unitaria ($\sum w = 1$). Estas variables están referenciadas a las tablas de ponderación del modelo TOPSIS.

Por otro lado, la celda de salida, destacada en color rojo, corresponde al resultado de la alternativa con el mayor índice de proximidad relativa $C^*C^*C^*$ en cada simulación. Esta celda actúa como punto de recopilación de resultados, registrando cuál es la alternativa óptima bajo cada conjunto aleatorio de ponderaciones.

Tras ejecutar un número elevado de iteraciones (10.000), el modelo permite identificar qué alternativa obtiene una mayor frecuencia de aparición como opción preferente. Esta frecuencia se interpreta como una medida de **robustez** frente a la variabilidad en las ponderaciones, aportando una visión más completa del comportamiento del sistema ante distintos escenarios de decisión.

@RISK - Preferencias de colores de celdas

☒ Colorear celdas de @RISK

Máximo 10000 celdas

Aplicar a

☒ Fondo
☐ Fuente
☐ Bordes
☐ Fuente y bordes

Colores

Funciones de entrada

Funciones de salida

Funciones estadísticas

Variables de optimización

?

Aceptar

Cancelar

Pesos	SUBCRITERIOS
0,09	Distancia De Transporte
0,09	Disponibilidad De Terreno
0,09	Acceso Al Lugar
0,09	Vida Útil del Vertedero
0,09	Restricciones En La Localización
0,09	Condiciones Hidro/Geológicas
0,09	Hidrología De Aguas Superficiales
0,09	Restricciones Ambientales/Urbanas
0,09	Suelo y Topografía
0,09	Condiciones Climatológicas
0,09	Aspectos Socioculturales

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

=RiskTriang(0;0,09;0,18)

ALT ELEGIDA

0,588

4,000

=RiskOutput()+

COINCIDIR(MAX(D51:G51);

D51:G51; 0)

Por último, se incluyen las tablas con los valores de ponderación más representativos, seleccionados como resultado del análisis de sensibilidad. Estos valores han sido determinados mediante la modificación manual de las variables de entrada (pesos) dentro del rango permitido para cada subcriterio, respetando la distribución triangular definida en el modelo. A partir de estos resultados, se han generado las gráficas de sensibilidad que permiten visualizar cómo varía el orden de preferencia entre alternativas en función de la importancia relativa asignada a cada subcriterio.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (ECONÓMICO-OPERACIONAL)

Distancia De Transporte				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	2	4	3	1
0,18	1	4	3	2
0,10	2	4	3	1
0,11	1	4	3	2
	44,44%		55,56%	

para m
para M
para X
para Y

Disponibilidad de terreno				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	1	4	3	2
0,18	3	4	2	1
0,08	2	4	3	1
0,07	1	4	3	2
0,17	3	4	2	1
	56%		44%	

para m
para M
para X
para Y
para Z

Acceso al lugar				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	1	4	3	2
0,18	3	4	2	1
0,08	2	4	3	1
0,07	1	4	3	2
0,17	3	4	2	1
	56%		44%	

para m
para M
para X
para Y
para Z

Vida útil de vertedero				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	1	4	3	2
0,18	2	4	3	1
0,13	1	4	3	2
0,06	2	4	3	1
	27,78%		72,22%	

para m
para M
para X
para Y

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (AMBIENTAL)

Localización				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	2	4	3	1
0,18	1	4	3	2
0,09	2	4	3	1
0,10	1	4	3	2
	50,00%		50,00%	

Geol e Hidrogeol				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	2	4	3	1
0,18	1	3	4	2
0,12	2	4	3	1
0,13	1	4	3	2
0,14	1	3	4	2
	33,33%		66,67%	

Superficiales				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	2	4	3	1
0,18	1	4	3	2
0,10	2	4	3	1
0,11	1	4	3	2
	44,44%		55,56%	

Urbanismo				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	2	4	3	1
0,18	2	4	1	3
0,13	1	4	3	2
0,16	1	4	2	3
0,17	2	4	1	3
	27,78%		5,56%	72,22%

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (Técnico y Sociocultural)

Topografía				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	1	4	3	2
0,18	2	4	3	1
0,02	1	4	3	2
0,03	2	4	3	1
	11,11%		88,89%	

para m
para M
para X
para Y

Clima				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	1	4	3	2
0,18	2	4	3	1
0,06	1	4	3	2
0,07	2	4	3	1
	33,33%		66,67%	

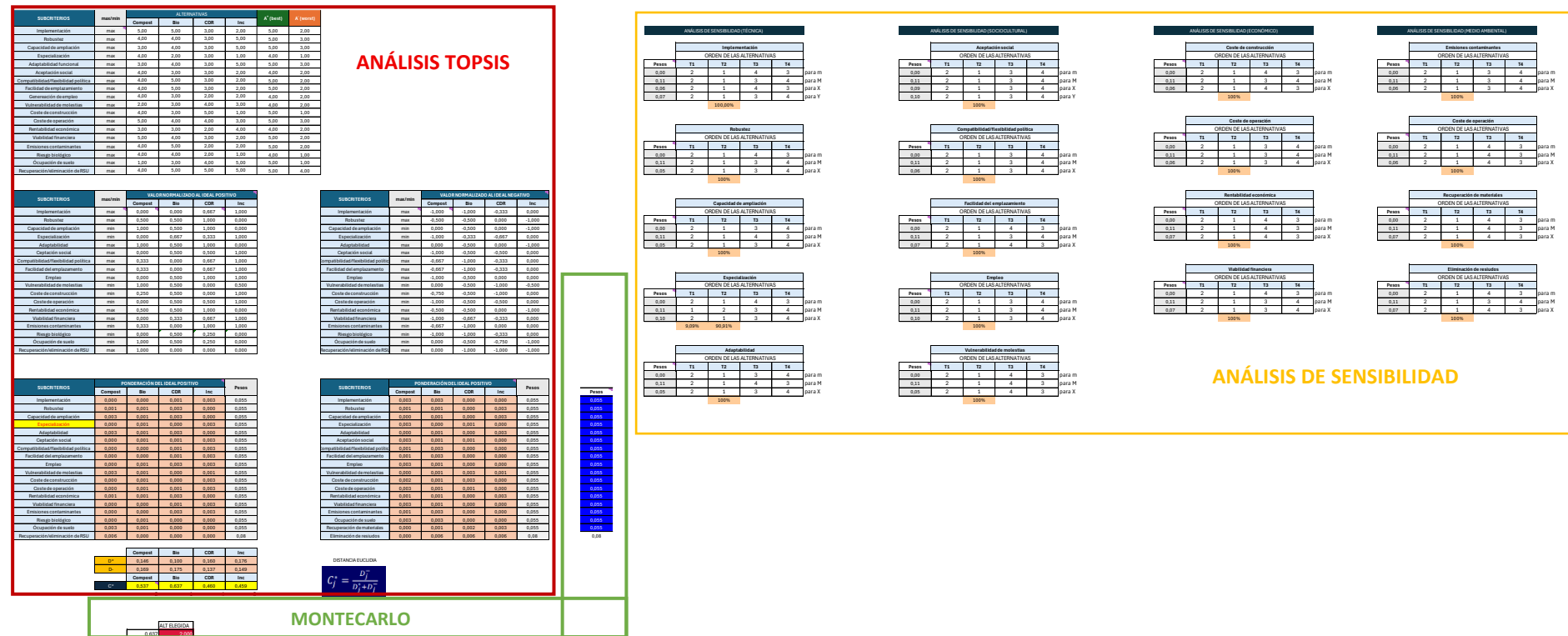
para m
para M
para X
para Y

Sociocultural				
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS				
Pesos	A1	A2	A3	A4
0,00	2	4	3	1
0,18	2	3	4	1
0,14	2	3	4	1
0,13	2	4	3	1
	0,00%		100,00%	

para m
para M
para X
para Y

Alternativas de tecnología

Siguiendo la misma estructura metodológica empleada para las alternativas de localización, en este apartado se detallan los distintos pasos realizados y los resultados obtenidos para el análisis de las alternativas tecnológicas. Se incluye la matriz de decisiones, la normalización de los valores respecto a las soluciones ideales, la ponderación de los subcriterios, el cálculo de las distancias euclídeas y la obtención del índice de proximidad relativa (C^*) para cada tecnología evaluada.



SUBCRITERIOS	max/min	ALTERNATIVAS				A* (best)	A' (worst)
		Compost	Bio	Inc	CDR		
Implementación	max	5,00	5,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Robustez	max	4,00	4,00	3,00	5,00	5,00	3,00
Capacidad de ampliación	max	3,00	4,00	3,00	5,00	5,00	3,00
Especialización	max	4,00	2,00	3,00	1,00	4,00	1,00
Adaptabilidad funcional	max	3,00	4,00	3,00	5,00	5,00	3,00
Aceptación social	max	4,00	3,00	3,00	2,00	4,00	2,00
Compatibilidad/flexibilidad política	max	4,00	5,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Facilidad de emplazamiento	max	4,00	5,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Generación de empleo	max	4,00	3,00	2,00	2,00	4,00	2,00
Vulnerabilidad de molestias	max	2,00	3,00	4,00	3,00	4,00	2,00
Coste de construcción	max	4,00	3,00	5,00	1,00	5,00	1,00
Coste de operación	max	5,00	4,00	4,00	3,00	5,00	3,00
Rentabilidad económica	max	3,00	3,00	2,00	4,00	4,00	2,00
Viabilidad financiera	max	5,00	4,00	3,00	2,00	5,00	2,00
Emisiones contaminantes	max	4,00	5,00	2,00	2,00	5,00	2,00
Riesgo biológico	max	4,00	4,00	2,00	1,00	4,00	1,00
Ócupación de suelo	max	1,00	3,00	4,00	5,00	5,00	1,00
Recuperación/eliminación de RSU	max	4,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL POSITIVO			
		Compost	Bio	CDR	Inc
Implementación	max	0,000	0,000	0,667	1,000
Robustez	max	0,500	0,500	1,000	0,000
Capacidad de ampliación	min	1,000	0,500	1,000	0,000
Especialización	min	0,000	0,667	0,333	1,000
Adaptabilidad	max	1,000	0,500	1,000	0,000
Acceptación social	max	0,000	0,500	0,500	1,000
Compatibilidad/flexibilidad política	max	0,333	0,000	0,667	1,000
Facilidad del emplazamiento	max	0,333	0,000	0,667	1,000
Empleo	max	0,000	0,500	1,000	1,000
Vulnerabilidad de molestias	min	1,000	0,500	0,000	0,500
Coste de construcción	min	0,250	0,500	0,000	1,000
Coste de operación	min	0,000	0,500	0,500	1,000
Rentabilidad económica	max	0,500	0,500	1,000	0,000
Viabilidad financiera	max	0,000	0,333	0,667	1,000
Emisiones contaminantes	min	0,333	0,000	1,000	1,000
Riesgo biológico	min	0,000	0,500	0,250	0,000
Ócupación de suelo	min	1,000	0,500	0,250	0,000
Recuperación/eliminación de RSU	max	1,000	0,000	0,000	0,000

SUBCRITERIOS	max/min	VALOR NORMALIZADO AL IDEAL NEGATIVO			
		Compost	Bio	CDR	Inc
Implementación	max	-1,000	-1,000	-0,333	0,000
Robustez	max	-0,500	-0,500	0,000	-1,000
Capacidad de ampliación	min	0,000	-0,500	0,000	-1,000
Especialización	min	-1,000	-0,333	-0,667	0,000
Adaptabilidad	max	0,000	-0,500	0,000	-1,000
Acceptación social	max	-1,000	-0,500	-0,500	0,000
Compatibilidad/flexibilidad política	max	-0,667	-1,000	-0,333	0,000
Facilidad del emplazamiento	max	-0,667	-1,000	-0,333	0,000
Empleo	max	-1,000	-0,500	0,000	0,000
Vulnerabilidad de molestias	min	0,000	-0,500	-1,000	-0,500
Coste de construcción	min	-0,750	-0,500	-1,000	0,000
Coste de operación	min	-1,000	-0,500	-0,500	0,000
Rentabilidad económica	max	-0,500	-0,500	0,000	-1,000
Viabilidad financiera	max	-1,000	-0,667	-0,333	0,000
Emisiones contaminantes	min	-0,667	-1,000	0,000	0,000
Riesgo biológico	min	-1,000	-1,000	-0,333	0,000
Ócupación de suelo	min	0,000	-0,500	-0,750	-1,000
Recuperación/eliminación de RSU	max	0,000	-1,000	-1,000	-1,000

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Pesos
	Compost	Bio	CDR	Inc	
Implementación	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Robustez	0,001	0,001	0,003	0,000	0,055
Capacidad de ampliación	0,003	0,001	0,003	0,000	0,055
Especialización	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Adaptabilidad	0,003	0,001	0,003	0,000	0,055
Ceptación social	0,000	0,001	0,001	0,003	0,055
Compatibilidad/flexibilidad política	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Facilidad del emplazamiento	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Empleo	0,000	0,001	0,003	0,003	0,055
Vulnerabilidad de molestias	0,003	0,001	0,000	0,001	0,055
Coste de construcción	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Coste de operación	0,000	0,001	0,001	0,003	0,055
Rentabilidad económica	0,001	0,001	0,003	0,000	0,055
Viabilidad financiera	0,000	0,000	0,001	0,003	0,055
Emisiones contaminantes	0,000	0,000	0,003	0,003	0,055
Riesgo biológico	0,000	0,001	0,000	0,000	0,055
Ócupación de suelo	0,003	0,001	0,000	0,000	0,055
Recuperación/eliminación de RSU	0,003	0,000	0,000	0,000	0,055

SUBCRITERIOS	PONDERACIÓN DEL IDEAL POSITIVO				Pesos
	Compost	Bio	CDR	Inc	
Implementación	0,003	0,003	0,000	0,000	0,055
Robustez	0,001	0,001	0,000	0,003	0,055
Capacidad de ampliación	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Especialización	0,003	0,000	0,001	0,000	0,055
Adaptabilidad	0,000	0,001	0,000	0,003	0,055
Ceptación social	0,003	0,001	0,001	0,000	0,055
Compatibilidad/flexibilidad política	0,001	0,003	0,000	0,000	0,055
Facilidad del emplazamiento	0,001	0,003	0,000	0,000	0,055
Empleo	0,003	0,001	0,000	0,000	0,055
Vulnerabilidad de molestias	0,000	0,001	0,003	0,001	0,055
Coste de construcción	0,002	0,001	0,003	0,000	0,055
Coste de operación	0,003	0,001	0,001	0,000	0,055
Rentabilidad económica	0,001	0,001	0,000	0,003	0,055
Viabilidad financiera	0,003	0,001	0,000	0,000	0,055
Emisiones contaminantes	0,001	0,003	0,000	0,000	0,055
Ócupación de suelo	0,003	0,003	0,000	0,000	0,055
Recuperación de materiales	0,000	0,001	0,002	0,003	0,055
Eliminación de residuos	0,000	0,003	0,003	0,003	0,055

	Compost	Bio	CDR	Inc
D*	0,134	0,100	0,160	0,176
D-	0,169	0,166	0,124	0,138

	Compost	Bio	CDR	Inc
C*	0,558	0,623	0,435	0,438

	ALT ELEGIDA
0,623	2,000

Pesos
0,055

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (TÉCNICA)

Implementación					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,06	2	1	4	3	para X
0,07	2	1	3	4	para Y
100,00%					

Robustez					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,05	2	1	3	4	para X
100%					

Capacidad de ampliación					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	4	3	para M
0,05	2	1	3	4	para X
100%					

Especialización					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	1	2	3	4	para M
0,10	2	1	3	4	para X
9,09% 90,91%					

Adaptabilidad					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	4	3	para M
0,05	2	1	3	4	para X
100%					

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (SOCIOCULTURAL)

Aceptación social					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,09	2	1	3	4	para X
0,10	2	1	3	4	para Y
100%					

Compatibilidad/flexibilidad política					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,06	2	1	3	4	para X
100%					

Facilidad del emplazamiento					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,07	2	1	4	3	para X
100%					

Empleo					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,10	2	1	3	4	para X
100%					

Vulnerabilidad de molestias					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	4	3	para M
0,05	2	1	4	3	para X
100%					

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (ECONÓMICO)

Coste de construcción					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,06	2	1	4	3	para X
100%					

Coste de operación					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,06	2	1	3	4	para X
100%					

Rentabilidad económica					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	4	3	para M
0,07	2	1	4	3	para X
100%					

Viabilidad financiera					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,07	2	1	3	4	para X
100%					

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (MEDIO AMBIENTAL)

Emisiones contaminantes					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	3	4	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,06	2	1	3	4	para X
100%					

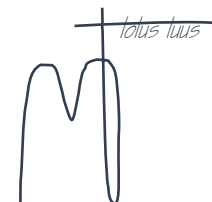
Coste de operación					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	4	3	para M
0,06	2	1	4	3	para X
100%					

Recuperación de materiales					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	4	3	para M
0,07	2	1	4	3	para X
100%					

Eliminación de residuos					
ORDEN DE LAS ALTERNATIVAS					
Pesos	T1	T2	T3	T4	
0,00	2	1	4	3	para m
0,11	2	1	3	4	para M
0,07	2	1	4	3	para X
100%					

INGENIERO AUTOR:

SERGIO ESCRIBANO PERALTA

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'M' followed by a vertical line and a horizontal stroke, with the words 'Sergio Escribano' written in cursive above the vertical line.

Valencia, junio de 2025