Universidad Europea

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA EL DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA DE RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. CASO DE ESTUDIO: ISLA DE MALLORCA.

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

D. Daniel Coriano González

Dirigida por:

D. José Luis López Oliete

Madrid, 2026

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios por permitirme llegar hasta aquí. A mis compañeros de máster, especialmente a Inés Serrano y a los canarios José Manuel y Óscar, por compartir conmigo esta etapa. A mi tutor, José Luis, por su dedicación y por todo lo aprendido durante este proceso.

DEDICATORIA

Dedicado especialmente a mi esposa Jehan, por apoyarme en todo momento. La realización de este trabajo, así como sacar adelante todo el máster, no habría sido posible sin ti. Y a mi hija Luna, por ser ese último impulso que necesitaba para lograr esta meta.

RESUMEN

Título: MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA EL DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA DE RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. CASO DE ESTUDIO: ISLA DE MALLORCA

Autor: Daniel Armando Coriano González

Tutor del TFM: D. José Luis López Oliete

Palabras Clave: recarga pública, carga rápida, turismos, vehículo eléctrico, movilidad eléctrica, infraestructura de recarga (EVCI), toma de decisiones, CPO, intensidad de tráfico, eficiencia y consumo energético, objetivos europeos 2030, viabilidad económica, inversión y rentabilidad, caso de estudio: Mallorca.

La expansión del vehículo eléctrico requiere que el desarrollo de la infraestructura de recarga se realice de forma planificada y coordinada con la movilidad, los usos del suelo y las condiciones de la red eléctrica. La coexistencia de iniciativas públicas y privadas no garantiza por sí sola una cobertura homogénea del territorio, por lo que resulta necesario disponer de criterios que permitan orientar futuras actuaciones y acompañar el crecimiento de la movilidad eléctrica.

El presente trabajo desarrolla el Modelo Pi, una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en análisis espacial multicriterio mediante QGIS. El modelo diferencia tres necesidades de recarga: residencial compartida, destino y oportunidad, y corredores interurbanos. Para cada una de ellas se combinan variables de demanda con la cobertura de la infraestructura existente, la viabilidad territorial y una aproximación a las condiciones de la red eléctrica.

Su aplicación a Mallorca permite identificar zonas con distinta prioridad según la función de recarga considerada. Los resultados muestran una mayor concentración de la prioridad residencial en los núcleos urbanos, de la recarga de destino en áreas de actividad y municipios turísticos, y de la recarga interurbana en determinados sectores de los principales corredores de movilidad. El resultado es una metodología que permite orientar futuras actuaciones sin determinar directamente emplazamientos definitivos y que puede adaptarse a otros territorios cuando se dispone de información equivalente.

ABSTRACT

Title: MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA EL DESPLIEGUE DE INFRAESTRUCTURA DE RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. CASO DE ESTUDIO: ISLA DE MALLORCA

Author: Daniel Armando Coriano González

Supervisor: José Luis López Oliete

Keywords: public charging, fast charging, passenger cars, electric vehicle, e-mobility, electric vehicle charging infrastructure (EVCI), decision making, CPO, traffic intensity, energy efficiency and consumption, 2030 European objectives, economic viability, investment and profitability, case study: Mallorca.

The expansion of electric mobility requires charging infrastructure to be developed in a planned manner and coordinated with mobility patterns, land use and electricity grid conditions. The coexistence of public and private initiatives does not in itself guarantee balanced territorial coverage, making it necessary to establish criteria that can guide future actions and support the continued growth of electric mobility.

This study develops the Pi Model, a decision-support tool based on spatial multi-criteria analysis using QGIS. The model distinguishes three charging needs: shared residential charging, destination and opportunity charging, and interurban corridor charging. For each of these, demand-related variables are combined with the coverage provided by the existing charging infrastructure, territorial feasibility and a preliminary assessment of electricity grid conditions.

Its application to Mallorca makes it possible to identify areas with different levels of priority according to the charging function considered. The results show a greater concentration of residential charging priority in urban areas, destination charging in activity centres and tourist municipalities, and interurban charging in specific sections of the main mobility corridors. The outcome is a methodology that can guide future infrastructure deployment without directly defining final locations and that can be adapted to other territories when equivalent data are available.

ACRÓNIMOS

AC / DC: Alternating Current / Direct Current (Corriente alterna / continua)

AFID: Alternative Fuels Infrastructure Directive

AFIR: Alternative Fuels Infrastructure Regulation

ANEI: Áreas Naturales de Especial Interés

ARIP: Áreas Rurales de Interés Paisajístico

APT: Àrea de Protecció Territorial (Categoría de protección en Baleares)

BEV: Battery Electric Vehicle (Vehículo eléctrico de batería)

BESS: *Battery Energy Storage Systems* (Sistemas de Almacenamiento de Energía mediante Baterías).

CAF: Capacidad de Acceso Firme (Potencia disponible en nudos de red)

CAIB: Comunitat Autònoma de les Illes Balears

CGP: Caja General de Protección (Punto de conexión a la red)

CO2: Carbon Dioxide (Dióxido de carbono)

GHG: (Greenhouse Gas / Gases de efecto invernadero)

CPO: Charge Point Operator (Operador de puntos de recarga)

EV / VE: Electric Vehicle / Vehículo Eléctrico

GIS / SIG: Geographic Information System / Sistema de Información Geográfica

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

ideIB: Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears

IMD: Intensidad Media Diaria (Volumen de tráfico vehicular)

ITC BT 52: Instrucción Técnica Complementaria 52 (Normativa de recarga)

kV: Kilovoltios (Unidades de tensión)

kW: Kilowatts (Unidades de potencia eléctrica)

MW: Megawatts (Unidades de potencia eléctrica)

OCPP: Open Charge Point Protocol (Protocolo de comunicación)

PCP: Private Charging Pile (Punto de recarga privado)

PHEV: Plug-In Hybrid Vehicle (Vehículo híbrido enchufable)

REBT: Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión

REE: Red Eléctrica de España

SENP: Sistemas Eléctricos No Peninsulares

ÍNDICE

RESUMEN **4**

ABSTRACT **5**

1. INTRODUCCIÓN **15**

1.1 Motivación del TFM 17

1.2 Objetivos Generales y específicos 20

1.3 Alcance 22

2. ESTADO DEL ARTE **23**

2.1 Contextualización y enfoque de la planificación estratégica 23

2.2 Gobernanza y proceso de decisión estratégica 23

2.3 Definición y estimación de la demanda operativa 24

2.4 Herramientas y metodología de planificación 27

2.5 Segmentación tecnológica 29

2.6 Análisis comparado de estrategias y marco regulatorio 30

2.7 Caracterización de la demanda y perfiles de usuario 38

2.8 Metodologías de planificación y localización de infraestructura 40

2.9 Predicción de demanda 46

2.10 Modelos de Localización y Dimensionamiento 49

2.11 Integración con la red eléctrica en contextos insulares 51

2.12 Evidencia empírica en mercados maduros: El caso de Noruega 52

2.13 Síntesis metodológica y relevancia para el TFM 53

3. METODOLOGÍA **55**

3.1 Introducción y relación con la necesidad identificada 55

3.2 Enfoque metodológico general 55

3.3 Estructura general de la metodología propuesta 56

3.4 Esquema funcional del Modelo Pi: inputs, cálculos y outputs 57

3.5 Datos de entrada y fuentes de información 58

3.6 Unidad espacial común y filtro de viabilidad territorial 62

3.7 Caracterización de la demanda por misión de recarga 63

3.8 Ponderación y outputs de los submodelos 74

3.9 Validación, limitaciones y replicabilidad 76

4. CASO DE ESTUDIO 77

4.1 Marco institucional y diagnóstico de la red de recarga eléctrica 77

4.2 Fuentes de información utilizadas en la aplicación a Mallorca 80

4.3 Estructura territorial y clasificación del suelo 81

4.4 Mallorca como sistema eléctrico y territorial singular 85

4.5 Diagnóstico y evolución del parque móvil en Mallorca 96

4.6 Análisis funcional de la infraestructura existente 100

4.7 Caracterización espacial de la demanda residencial compartida 104

4.8 Caracterización de la demanda de destino y oportunidad 113

4.9 Caracterización de la demanda asociada a corredores interurbanos 116

4.10 Aplicación integrada del Modelo Pi al caso de Mallorca 121

4.11 Síntesis estratégica del caso de estudio 127

5. RESULTADOS 128

5.1 Presentación general de los resultados 128

5.2 Resultados del submodelo de recarga residencial compartida 128

5.3 Resultados del submodelo de recarga de destino y oportunidad 130

5.4 Resultados del submodelo de corredores interurbanos 131

5.5 Comparación entre las tres misiones de recarga 133

5.6 Validación e interpretación de los resultados 133

5.7 Síntesis de resultados 134

6. CONCLUSIONES 135

6.1 Principales conclusiones del estudio 135

6.2 Cumplimiento de los objetivos 137

6.3 Alcance y limitaciones del estudio 139

6.4 Líneas futuras de desarrollo 140

7. ESTRATEGIA DE SOSTENIBILIDAD 141

7.1 Alineación Estratégica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)..... 141

7.2 Indicadores de seguimiento de la sostenibilidad del Modelo Pi 142

8. BIBLIOGRAFÍA 144

ANEXO A. DICCIONARIO DE CAMPOS Y REGLAS DE CÁLCULO DEL MODELO PI..... 154

A.1 Campos comunes y viabilidad territorial 155

A.2 Campos del submodelo de recarga residencial compartida..... 156

A.3 Campos del submodelo de recarga de destino y oportunidad..... 160

A.4 Campos del submodelo de recarga en corredores interurbanos 162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Crecimiento de ventas de vehículos eléctricos por región. Fuente: Tayri & Ma (2025). Elaboración propia. 17
Figura 2 Distribución territorial de la infraestructura de recarga de acceso público fuera de servicio en España (3T 2025). Fuente: Barómetro de Electromovilidad de ANFAC (3T 2025). Elaboración propia. 18
Figura 3 Índice de Calidad del Aire en Europa (European Air Quality Index). Fuente: European Environment Agency (2025). Elaboración propia. 19
Figura 4 Principio simplificado de un enfoque basado en nodos. Fuente: Metais et al. (2022). Elaboración propia. 42
Figura 5 Principio simplificado de un enfoque basado en trayectorias. Fuente: Metais et al. (2022). Elaboración propia. 44
Figura 6 Principio simplificado de un enfoque basado en recorridos. Fuente: Metais et al. (2022). Elaboración propia. 45
Figura 7 Esquema funcional del Modelo Pi: datos de entrada, procesos de cálculo y resultados. Fuente: elaboración propia. 58
Figura 8 Distribución geográfica de los puntos de recarga integrados en la red MELIB en Mallorca. Fuente: Institut Balear de l'Energia (IBE). 78
Figura 9 Distribución de puntos de recarga de la red privada de Endesa X Way en Mallorca. Fuente: Endesa X Way (s. f.). 80
Figura 10 Clasificación de usos del suelo en Mallorca mediante el visor ideIB. Fuente: ideIB (https://ideib.caib.es/visor). 82
Figura 11 Categorías del suelo rústico en Mallorca mediante el visor ideIB. Fuente: ideIB (https://ideib.caib.es/visor). 83
Figura 12 Máscara maestra de viabilidad territorial del Modelo Pi, generada a partir de la cartografía de ideIB. Fuente: ideIB. Elaboración propia en QGIS. 84
Figura 13 Magnitudes principales del sistema eléctrico balear. Fuente: Red Eléctrica de España (2025a), datos de 2024. 86
Figura 14 Producción de energía eléctrica y aportación del enlace Península-Baleares (2024). Fuente: Red Eléctrica de España (2025a), datos de 2024. 87
Figura 15 Nudos de la red de distribución de Mallorca con capacidad firme de demanda positiva publicada. Fuente: e-distribución, consulta marzo de 2026. Elaboración propia en QGIS. 90

Figura 16 Distribución espacial de la oportunidad eléctrica preliminar (OP_ELEC) en Mallorca. Fuente: e-distribución (2026 datos consultados en marzo de 2026). Elaboración propia en QGIS. 92
Figura 17 Evolución histórica del parque de turismos en Mallorca segmentado por categoría eléctrica (2020 a 2024). Fuente: Panel de Datos del Parque de Vehículos (DGT, 2025). Elaboración propia. 97
Figura 18 Ejemplo de depuración de duplicidades entre fuentes de puntos de recarga. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS. 101
Figura 19 Capa unificada de puntos de recarga existentes tras el proceso de depuración. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS. 102
Figura 20 Cobertura de puntos de recarga en el entorno del Aeropuerto de Son Sant Joan y áreas próximas. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS. 103
Figura 21 Puntos de recarga identificados en el entorno del Hospital Universitario Son Espases y área de Son Pacs. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS. 103
Figura 22 Distribución de las tipologías residenciales consideradas para la caracterización de la demanda de recarga compartida. Fuente: cartografía de calificaciones urbanísticas de ideIB. Elaboración propia en QGIS. 105
Figura 23 Tasa de motorización municipal en Mallorca. Clasificación de los municipios según el número de turismos por cada 1.000 habitantes. Fuente: Datos municipales – información general 2025 (DGT, 2026). Elaboración propia en QGIS. 107
Figura 24 Distribución municipal de la presión residencial electrificada en Mallorca. Fuente: Datos municipales – información general 2025 (DGT, 2026). Elaboración propia en QGIS. 108
Figura 25 Clasificación del déficit relativo de aparcamiento privado en el entorno de Palma. Fuente: Dirección General del Catastro, Descarga de información alfanumérica por provincia en formato CAT. Elaboración propia mediante Python y QGIS. 110
Figura 26 Demanda potencial de recarga residencial compartida en el ámbito analizado. Fuente: Datos municipales – información general 2025 (DGT, 2026), Dirección General del Catastro (s. f.) y cartografía de ideIB (ICGIB, s. f.). Elaboración propia en QGIS. 112
Figura 27 Demanda local de destino y oportunidad en Palma y su entorno. Fuente: AETIB (s. f.), INE (2026) y OpenStreetMap contributors (s. f.). Elaboración propia en QGIS. 115
Figura 28 Distribución de los corredores interurbanos definidos a partir de los principales flujos origen-destino de residentes y turistas en Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024) e ideIB (ICGIB, s. f.). Elaboración propia en QGIS. 120

Figura 29 Esquema de aplicación del Modelo Pi al caso de Mallorca: entradas, proceso de cálculo y salidas. Fuente: elaboración propia. 122
Figura 30 Prioridad final para la recarga residencial compartida en Palma y su entorno metropolitano. Fuente: DGT (2026), Catastro, ideIB, infraestructura de recarga y e-distribución. Elaboración propia en QGIS. 123
Figura 31 Prioridad final para la recarga de destino y oportunidad en Mallorca. Fuente: AETIB, INE, OpenStreetMap, e-distribución e infraestructura de recarga existente. Elaboración propia en QGIS. 125
Figura 32 Prioridad final para la recarga en corredores interurbanos de Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024), e-distribución e infraestructura de recarga existente. Elaboración propia en QGIS. 127
Figura 33 Detalle prioridad final para la recarga en corredores interurbanos de Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024), e-distribución e infraestructura de recarga existente. Elaboración propia en QGIS 127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Anexo de la Ley 10/2019, de 22 de febrero, de cambio climático y transición energética de las Illes Balears. Fuente: Ley 10/2019, de 22 de febrero. Elaboración propia. 36
Tabla 2 Puntuación asignada a las tipologías residenciales consideradas en el submodelo de recarga residencial compartida. Fuente: elaboración propia..... 67
Tabla 3 Clasificación del déficit relativo de aparcamiento privado y asignación de la puntuación NEC_AC. Fuente: elaboración propia. 67
Tabla 4 Estructura de ponderación y outputs de los submodelos del Modelo Pi. Fuente: elaboración propia. 75
Tabla 5 Principales fuentes de información utilizadas en la aplicación del Modelo Pi al caso de Mallorca. Fuente: elaboración propia. 81
Tabla 6 Indicadores de sostenibilidad y calidad del sistema eléctrico (2024). Fuente: Nota de Prensa de Red Eléctrica de España (2025b). Elaboración propia 86
Tabla 7 Selección de nudos de la red de distribución de Mallorca y capacidad de acceso firme de demanda publicada. Fuente: e-distribución (2026), consulta marzo de 2026. Elaboración propia. 89
Tabla 8 Evolución de la flota eléctrica, incorporaciones netas estimadas y tasa de penetración EV Uptake en Mallorca (2020–2024). Fuente: Panel de Datos del Parque de Vehículos (DGT, 2025). Elaboración propia. 98
Tabla 9 Clasificación del déficit relativo de aparcamiento privado y asignación de la puntuación de necesidad de recarga compartida. Fuente: Dirección General del Catastro, Descarga de información alfanumérica por provincia en formato CAT. Elaboración propia. 110
Tabla 10 Principales relaciones de movilidad residente intermunicipal en Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024). Elaboración propia. 117
Tabla 11 Principales relaciones de movilidad turística intermunicipal en Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024). Elaboración propia. 118
Tabla 12 Corredores interurbanos definidos a partir de las principales relaciones origen-destino de residentes y turistas. Fuente: Consell de Mallorca (2024). Elaboración propia. 119
Tabla 13 Principales municipios con presencia de celdas de prioridad residencial alta o muy alta. Fuente: resultados del Modelo Pi obtenidos en QGIS. Elaboración propia. 129
Tabla 14 Principales municipios con presencia de celdas de prioridad alta o muy alta para la recarga de destino y oportunidad. Fuente: resultados del Modelo Pi obtenidos en QGIS. Elaboración propia. 130

Tabla 15 Distribución de la prioridad de recarga asociada a los corredores interurbanos. Fuente: resultados del Modelo Pi obtenidos en QGIS. Elaboración propia. 132
Tabla 16 Comparación de las salidas finales del Modelo Pi según la misión de recarga. Fuente: e-distribución (2026), datos consultados en marzo de 2026. Elaboración propia en QGIS. 133
Tabla 17 Indicadores de seguimiento de la sostenibilidad del Modelo Pi. Fuente: criterios del Modelo Pi y de Naciones Unidas (2015). Elaboración propia. 142

1. INTRODUCCIÓN

La electrificación del transporte por carretera en la Unión Europea ha dejado de ser una aspiración a largo plazo para convertirse en un proceso regulado y en curso. Con la entrada en vigor del Reglamento (UE) 2023/1804 (AFIR), la infraestructura pública de recarga pasa a ocupar un papel central como condición habilitante para el cumplimiento de los objetivos climáticos y de descarbonización fijados para 2035. En este nuevo contexto, el vehículo eléctrico constituye ya una realidad de mercado consolidada, cuya expansión depende de forma crítica de la disponibilidad, fiabilidad y adecuada planificación de la infraestructura asociada.

Diversos organismos internacionales coinciden en señalar que el principal cuello de botella para la adopción masiva del vehículo eléctrico no reside ya en la tecnología del vehículo, sino en la infraestructura de recarga. La Agencia Internacional de la Energía por medio de su informe "Global EV Outlook 2025" identifica la accesibilidad y fiabilidad de la red pública como uno de los factores determinantes en la decisión de compra, especialmente para los usuarios sin posibilidad de recarga doméstica (IEA, 2025). Además, la Agencia Europea de Medio Ambiente señala que el número de puntos de recarga de acceso público en la Unión Europea ha aumentado de forma sostenida durante la última década y que el desarrollo de esta infraestructura resulta esencial para apoyar la electrificación del transporte por carretera (*European Environment Agency* [EEA], 2024). En este sentido, el despliegue de infraestructura se configura como un problema de planificación territorial y energética, más que como una mera cuestión de número de puntos instalados.

En el caso español, pese al impulso normativo y financiero recogido en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima PNIEC 2023–2030, persisten disfunciones relevantes en el proceso de implantación. En España, la expansión de la infraestructura continúa enfrentándose a problemas de puesta en servicio. López (2025) señala que durante el primer semestre de 2025 se alcanzaron 47.519 puntos de recarga, aunque aproximadamente uno de cada cinco puntos públicos no se encontraba operativo, principalmente por encontrarse pendiente de conexión a la red eléctrica.

Estas dificultades se intensifican en territorios insulares como Mallorca, donde el despliegue de infraestructura se ve condicionado por un sistema eléctrico con capacidad limitada, un territorio físicamente acotado y una elevada estacionalidad turística que introduce fuertes variaciones temporales en la demanda. A pesar de iniciativas como la red MELIB impulsada por el Institut Balear de l'Energia, la planificación de la infraestructura se enfrenta al reto de atender simultáneamente a la población residente y a los picos de demanda asociados al turismo, sin incurrir en sobredimensionamientos ineficientes.

El análisis del funcionamiento de la red pública en el entorno urbano de Palma pone de manifiesto estas disfunciones de forma clara: determinados puntos de recarga en vía pública presentan elevados niveles de saturación y uso impropio como estacionamiento, mientras que infraestructuras equivalentes ubicadas en aparcamientos subterráneos, como el de Parc de la Mar, registran una utilización significativamente menor. Esta disparidad evidencia que la ubicación, la accesibilidad, el coste indirecto y la tipología de recarga influyen decisivamente en el comportamiento del usuario, y que la mera existencia física del punto no garantiza su uso efectivo.

En este contexto, la planificación de la infraestructura pública de recarga plantea una cuestión central: qué zonas presentan una mayor prioridad para el despliegue de infraestructura, qué necesidades de recarga deben atenderse y bajo qué criterios territoriales, de demanda y de red deben establecerse estas prioridades.

El presente Trabajo de Fin de Máster se enmarca en esta problemática y tiene como objetivo desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en análisis espacial multicriterio, adaptada a la realidad insular de Mallorca, que integra criterios de demanda, cobertura existente, oportunidad eléctrica y viabilidad territorial para identificar y priorizar zonas para el despliegue de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos.

A continuación, se expone la motivación que ha llevado al desarrollo de este trabajo.

1.1 Motivación del TFM

La transición hacia la movilidad eléctrica se ha acelerado de forma notable en los últimos años, consolidándose como uno de los principales vectores para la descarbonización del transporte. Este proceso ha venido acompañado de un crecimiento sostenido del parque de vehículos eléctricos (VE) a escala global y una penetración creciente en el mercado de vehículos nuevos (Tayri & Ma, 2025). Este crecimiento no constituye únicamente un reto tecnológico, sino que traslada el foco hacia la capacidad de las infraestructuras de recarga para absorber y acompañar dicha expansión de forma ordenada y eficiente.

En este sentido, la Figura 1 muestra el crecimiento de las ventas de vehículos eléctricos por regiones a escala global, evidenciando la aceleración del proceso de electrificación del transporte y anticipando la presión creciente que este aumento del parque de vehículos ejerce sobre las infraestructuras de recarga existentes y futuras.

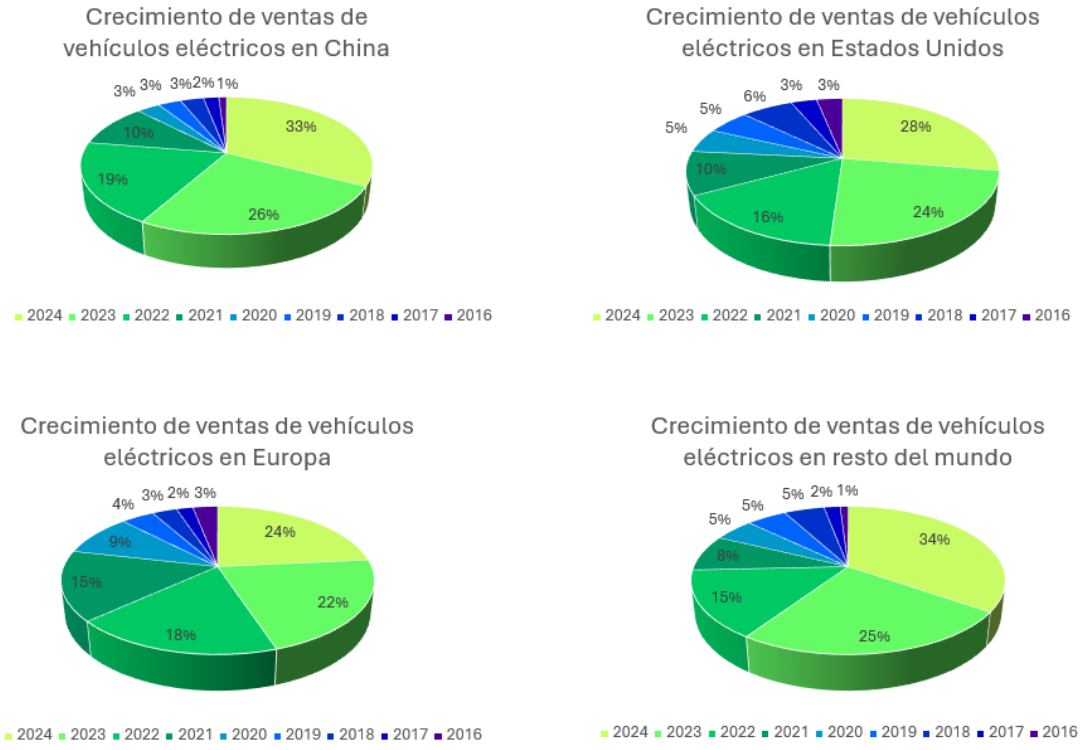


Figura 1 Crecimiento de ventas de vehículos eléctricos por región. Fuente: Tayri & Ma (2025). Elaboración propia.

En el contexto español, el crecimiento de la infraestructura instalada no implica necesariamente un aumento equivalente de su disponibilidad efectiva. López (2025) señala que persisten retrasos significativos en la puesta en servicio de puntos de recarga ya instalados, asociados principalmente a problemas de conexión eléctrica y otras incidencias técnicas. Estas dificultades reducen la capacidad efectiva de la red y pueden afectar a la confianza de los usuarios en la infraestructura pública.

Esta situación también se refleja en el Barómetro de Electromovilidad de ANFAC (Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones [ANFAC], 2025) correspondiente al tercer trimestre de 2025. En ese periodo, la red española alcanzó 52.107 puntos de recarga de acceso público, mientras que otros 14.643 puntos instalados permanecían fuera de servicio, equivalentes al 22 % de la infraestructura total instalada. El propio barómetro muestra además diferencias entre comunidades autónomas en el desarrollo de la infraestructura de recarga, lo que evidencia una evolución territorial desigual.

En vista de lo anterior, la Figura 2 muestra la distribución territorial de los puntos de recarga de acceso público que se encuentran fuera de servicio en España. Su representación permite observar que la existencia física de infraestructura instalada no equivale necesariamente a disponibilidad efectiva, y que las dificultades de puesta en servicio presentan además una distribución territorial heterogénea**.**

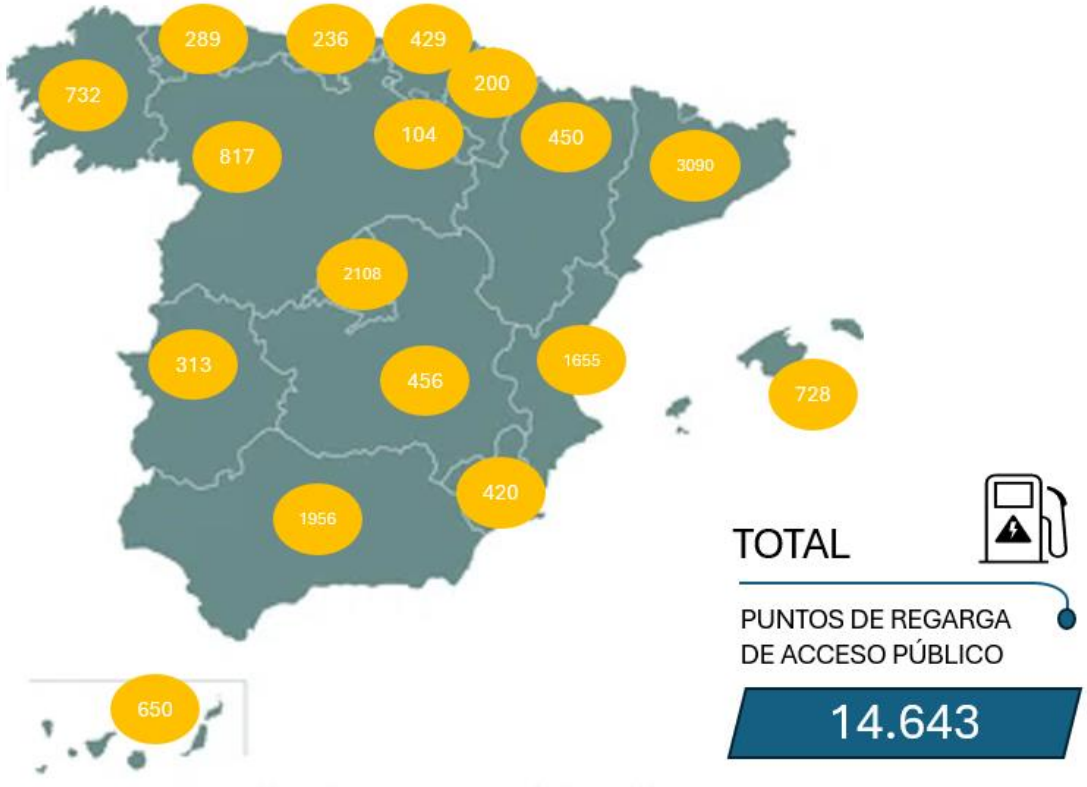


Figura 2 Distribución territorial de la infraestructura de recarga de acceso público fuera de servicio en España (3T 2025). Fuente: Barómetro de Electromovilidad de ANFAC (3T 2025). Elaboración propia.

Más allá de los objetivos climáticos globales, la planificación de la infraestructura de recarga presenta también implicaciones directas sobre la calidad del aire en entornos urbanos. La *European Environment Agency* señala que, pese a la mejora general registrada en las últimas décadas, una parte muy elevada de la población urbana europea continúa expuesta a concentraciones de contaminantes superiores a los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud. En particular, el transporte por carretera constituye la principal fuente de

dióxido de nitrógeno (NO_2), especialmente en las zonas densamente pobladas. En este contexto, la transición progresiva hacia la movilidad eléctrica refuerza la necesidad de disponer de una infraestructura de recarga adecuada, funcional y accesible (EEA, 2023).

A continuación, la figura 3 muestra el estado de la calidad del aire en Mallorca según las estaciones de medición disponibles, permitiendo contextualizar la situación ambiental actual del territorio.

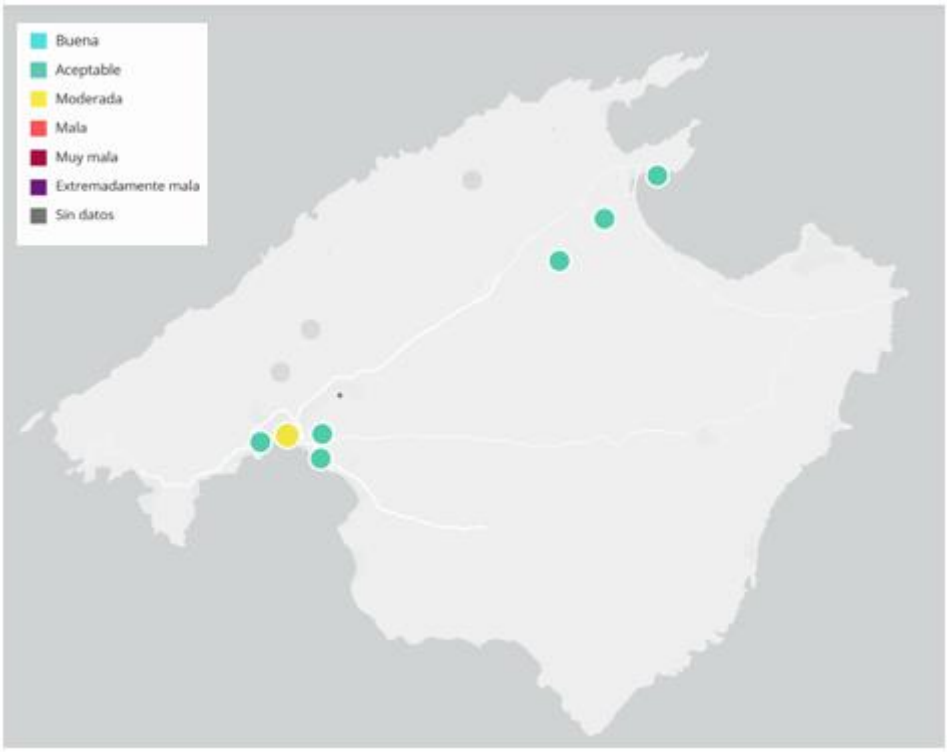


Figura 3 Índice de Calidad del Aire en Europa (European Air Quality Index). Fuente: European Environment Agency (2025). Elaboración propia.

La planificación de la infraestructura pública de recarga se configura, así como un elemento decisivo para garantizar una transición eficaz hacia la movilidad eléctrica. Aunque en España el número de puntos instalados ha aumentado de forma significativa, persisten retos relacionados con su operatividad, disponibilidad y adecuación territorial, lo que pone de relieve la necesidad de herramientas específicas que permitan orientar la toma de decisiones en materia de localización, tipología y priorización de inversiones.

En Mallorca, esta necesidad es especialmente evidente. La condición insular, la restricción espacial y la marcada estacionalidad turística generan patrones de uso que no se ajustan a los modelos convencionales de planificación. A ello se suma la experiencia observada en la red MELIB, donde se detectan situaciones de saturación, infrautilización o falta de coherencia entre la tipología de los puntos y el entorno en el que se ubican. Estas situaciones ponen de manifiesto que un despliegue basado únicamente en criterios oportunistas o reactivos no garantiza un servicio eficaz ni un uso eficiente de los recursos públicos.

La motivación de este trabajo radica, por tanto, en abordar el despliegue de la infraestructura de recarga como un problema de planificación y toma de decisiones, más que como un mero ejercicio de expansión cuantitativa. El desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones adaptada al contexto insular de Mallorca constituye una oportunidad para mejorar la eficiencia del despliegue futuro, proporcionar criterios objetivos de priorización y contribuir a la evolución ordenada y coherente de la red pública de recarga. Por todo lo expuesto, se hace necesario definir los objetivos que orientan el desarrollo de este trabajo para abordar de manera sistemática la problemática descrita.

1.2 Objetivos Generales y específicos

En este apartado se definen los objetivos que rigen el desarrollo del trabajo, los cuales sirven de marco de referencia para el análisis propuesto. Estos se estructuran en objetivos generales, que establecen la dirección estratégica del estudio, y objetivos específicos, que desglosan las fases técnicas necesarias para su cumplimiento.

1.2.1. Objetivos Generales

Como base de la investigación, se establecen los siguientes objetivos generales que recogen la meta final del estudio:

G.1 Contribuir al desarrollo de una infraestructura pública de recarga de vehículos eléctricos coherente con los objetivos climáticos y de movilidad sostenible establecidos por la Unión Europea.

G.2 Favorecer una planificación eficiente, equilibrada y territorialmente coherente de la red pública de recarga en Mallorca.

G.3 Desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que oriente futuras inversiones y actuaciones en la infraestructura de recarga de la isla.

1.2.2. Objetivos Específicos

Con el fin de alcanzar las metas estratégicas planteadas, se detallan los objetivos específicos vinculados a cada línea de actuación:

En relación con el Objetivo General G.1

Para el desarrollo de esta línea estratégica se plantean los siguientes hitos:

- **G.1.1** Analizar el marco normativo y estratégico vigente (AFIR, PNIEC, normativa autonómica y municipal).
- **G.1.2** Identificar los estándares técnicos, funcionales y de servicio requeridos para una infraestructura pública alineada con los objetivos de descarbonización.

- **G.1.3** Revisar las metodologías internacionales de referencia aplicadas en países líderes para extraer buenas prácticas adaptables al contexto insular.

En relación con el Objetivo General G.2

Para la consecución de una planificación equilibrada se establecen los siguientes puntos:

- **G.2.1** Analizar las características generales y la distribución funcional de la infraestructura de recarga existente.
- **G.2.2** Analizar su distribución territorial y cobertura considerando la estructura urbana, la insularidad y la estacionalidad turística.
- **G.2.3** Identificar carencias, zonas deficitarias y oportunidades de mejora desde una perspectiva técnica y territorial.

En relación con el Objetivo General G.3

Para el diseño y validación de la herramienta de decisión se proponen los siguientes pasos:

- **G.3.1** Definir criterios técnicos, territoriales, energéticos y socioeconómicos que deben integrar un modelo de decisión.
- **G.3.2** Diseñar una herramienta multicriterio adaptada a la realidad insular para priorizar zonas candidatas para futuras actuaciones de implantación, repotenciación, ampliación o mejora de la infraestructura de recarga.
- **G.3.3** Validar conceptualmente la herramienta mediante su aplicación al caso de Mallorca.

1.3 Alcance

El presente trabajo se centra en la planificación estratégica de la infraestructura pública de recarga de vehículos eléctricos en la isla de Mallorca desde una perspectiva técnica, territorial y metodológica. El alcance incluye el análisis del marco regulatorio europeo, nacional y autonómico aplicable al despliegue de infraestructura de recarga, así como la revisión de metodologías utilizadas en países con ecosistemas de movilidad eléctrica consolidados, con el fin de identificar estándares y criterios transferibles al contexto insular.

Asimismo, el trabajo incorpora una evaluación técnica y territorial de la infraestructura de recarga existente en Mallorca, analizando su distribución, características generales y cobertura espacial a partir de la información disponible en las fuentes consultadas. El diagnóstico considera tanto la infraestructura de acceso público como otras localizaciones registradas en las bases de datos utilizadas, con especial atención a la red MELIB. Su finalidad es detectar carencias de cobertura, patrones de distribución territorial, limitaciones y oportunidades de mejora de la red existente.

A partir de los marcos de referencia analizados y del diagnóstico insular, el estudio desarrolla el Modelo Pi, una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en análisis espacial multicriterio. El modelo permite identificar zonas con diferente prioridad relativa para futuras actuaciones sobre la infraestructura de recarga, diferenciando las necesidades asociadas a la recarga residencial compartida, la recarga de destino y oportunidad y la recarga en corredores interurbanos.

La herramienta se plantea como un instrumento estratégico de apoyo a la planificación territorial en Mallorca. Su alcance se limita a la identificación y priorización de zonas, sin determinar ubicaciones definitivas para las instalaciones. La selección de un emplazamiento concreto requerirá posteriormente estudios específicos de carácter técnico, urbanístico, ambiental, jurídico y administrativo, así como la correspondiente evaluación de acceso y conexión a la red eléctrica. El trabajo tampoco aborda el diseño constructivo detallado de instalaciones individuales.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Contextualización y enfoque de la planificación estratégica

El despliegue de infraestructura de recarga para vehículos eléctricos (VE) ha pasado de una implantación reactiva a una planificación estratégica basada en datos. A escala internacional, la *International Energy Agency* (IEA, 2025) subraya que dicha planificación debe considerar no solo los patrones de movilidad, sino también la capacidad eléctrica disponible y la interoperabilidad de los sistemas. En España, López (2025) identifica barreras asociadas a la puesta en servicio de la infraestructura, especialmente por los retrasos en la conexión a red y las diferencias existentes entre territorios. La planificación de infraestructuras en entornos insulares con elevada presión turística plantea, además, la necesidad de integrar de forma conjunta criterios territoriales, de demanda y de red eléctrica.

Para superar una aproximación meramente descriptiva y profundizar en el estado del arte de la materia, este capítulo se articula a partir de un conjunto de interrogantes clave que surgen al abordar la planificación de una red de recarga:

2.2 Gobernanza y proceso de decisión estratégica

El primer bloque de interrogantes se centra en la arquitectura de decisión que rige el despliegue. Más allá de los requerimientos técnicos, la gobernanza del despliegue debe responder a una estrategia coordinada que optimice la inversión y garantice una distribución eficiente de la infraestructura en el territorio.

2.2.1. Lógica de localización: de la oportunidad de mercado a la planificación técnica

Instalar un punto de recarga no debería ser una decisión de última hora ni depender solo de encontrar un terreno libre con facilidad. La diferencia entre una red que simplemente ocupa espacio y otra que realmente funciona reside en el criterio que se use para elegir su ubicación. Por ello, se plantea el siguiente dilema:

¿Bajo qué lógica se decide la ubicación de los puntos de recarga: por oportunidad de suelo o mediante una planificación técnica de red?

Para resolver esta cuestión, es necesario analizar cómo ha evolucionado el despliegue de infraestructura. El paso de un modelo basado en la disponibilidad de terreno a uno basado en el rendimiento del sistema eléctrico revela los siguientes puntos clave:

Problemática: En el contexto actual predomina la lógica de oportunidad. La infraestructura se despliega de forma reactiva donde hay suelo disponible o conexión sencilla (estaciones de

servicio o centros comerciales), lo que puede generar distribuciones de infraestructura más condicionadas por la oportunidad de implantación que por una planificación conjunta de demanda, territorio y red eléctrica.

Situación actual: El Reglamento (UE) 2023/1804 (AFIR) impulsa el tránsito hacia una planificación proactiva. Experiencias como la alemana muestran el uso de herramientas geoespaciales que relacionan la demanda prevista con condicionantes territoriales y de red.

Cuestionamiento técnico: Este interrogante es crítico en entornos insulares. La disponibilidad limitada de suelo y los condicionantes de la red eléctrica obligan a que la planificación técnica prevalezca sobre la disponibilidad física para garantizar la viabilidad de la red a largo plazo.

2.2.2. Liderazgo del despliegue: equilibrio entre cohesión territorial y rentabilidad

Desplegar una red de cargadores que funcione no es solo un reto tecnológico, sino que depende directamente de quién tome las decisiones de la inversión. Que la infraestructura crezca rápido y llegue a todos los puntos de la isla por igual está condicionado por el papel que jueguen el sector público y el privado. Esta realidad lleva a plantear la siguiente pregunta central:

¿Debe liderar el despliegue la iniciativa pública para garantizar la cohesión territorial o la iniciativa privada para maximizar la rentabilidad?

El reto principal consiste en encontrar un equilibrio entre la viabilidad económica de los operadores y la necesidad de asegurar una red con cobertura total. Al estudiar el contexto internacional, se observan diversos enfoques para abordar este problema.

Problemática: Existe una tensión natural entre la viabilidad económica de los operadores (que buscan zonas de alta rotación) y la necesidad de asegurar cobertura total en zonas de baja densidad poblacional para evitar zonas de sombra.

Situación actual: Se observan modelos híbridos. Mientras Noruega usó el liderazgo público como motor de arranque (*jump-start*), España y Baleares (Ley 10/2019) proponen una gobernanza inducida: al obligar por normativa a renovar flotas de *rent-a-car*, se garantiza una demanda que reduce el riesgo para la inversión privada.

Cuestionamiento técnico: Se cuestionan los modelos de liderazgo tradicionales por su dificultad para asegurar una distribución equilibrada en territorios con alta estacionalidad. Esto justifica la utilización de herramientas de apoyo a la decisión que permitan orientar territorialmente futuras actuaciones de forma transparente y replicable.

2.3 Definición y estimación de la demanda operativa

Estimar la demanda no consiste en contar vehículos, sino en modelar el comportamiento energético de los usuarios en el espacio y el tiempo.

2.3.1. Conceptualización operativa de la demanda

Entender la demanda no es solo saber cuántos coches eléctricos hay en circulación. El verdadero reto es descifrar dónde y cuándo deciden los usuarios conectarse a la red, especialmente en un entorno donde las rutinas cambian según la zona. Este cambio de enfoque lleva a plantear la siguiente cuestión:

¿Cómo se define operativamente la demanda?

La respuesta a este interrogante condiciona la capacidad de cualquier modelo de planificación para representar adecuadamente las necesidades territoriales de recarga. Traducir una cifra estadística en un mapa de necesidades reales requiere dejar atrás las mediciones generales y empezar a analizar la demanda como un proceso variable que depende directamente de la actividad urbana:

Problemática: El error común ha sido el uso de modelos estáticos vinculados solo a la carga residencial nocturna. Este enfoque ignora el comportamiento estocástico del usuario y los tiempos de estancia fuera del hogar, generando un riesgo de infrautilización de la infraestructura pública.

Situación actual: La definición operativa ha evolucionado hacia enfoques que relacionan la necesidad de recarga con el lugar, la actividad y el tiempo de permanencia del usuario. Adenaw y Krapf (2022) muestran que el uso del suelo y los Puntos de Interés (POIs) aportan información relevante para caracterizar diferencias en la utilización de la infraestructura, complementando los indicadores agregados de población.

Cuestionamiento técnico: Se cuestiona la validez de los modelos basados en variables estáticas en contextos de alta población flotante. La estacionalidad turística hace que los promedios anuales sean insuficientes, haciendo necesario incorporar variables capaces de representar la población flotante, las actividades y el uso del suelo.

2.3.2. Fuentes de información y captura de datos

la calidad del análisis depende de que los datos sean fiables. Los métodos tradicionales como las encuestas suelen tener un problema: existe una diferencia importante entre lo que los usuarios dicen que harán y cómo actúan realmente cuando necesitan cargar su vehículo. Para reducir este sesgo, se recurre a fuentes de información más directas:

¿Qué medios existen para obtener la demanda de una zona de estudio?

El paso de la teoría a la práctica exige herramientas de captura que minimicen el error humano y la subjetividad. La evolución tecnológica ha permitido pasar de la simple opinión del usuario al registro masivo de movimientos, lo que define el estado del arte actual en la toma de datos:

Problemática: Los métodos tradicionales, basados mayoritariamente en encuestas de preferencia declarada, son incapaces de captar la complejidad de los sistemas de alta movilidad. Al depender de la percepción subjetiva del usuario, estos medios suelen fallar al intentar modelar el comportamiento estocástico y las decisiones de carga no lineales, lo que genera una base de datos poco fiable para la planificación técnica.

Situación actual: Märtz et al. (2022) muestran que el procesamiento de grandes volúmenes de datos reales permite identificar patrones temporales y grupos de comportamiento mediante técnicas de *clustering*. Este tipo de análisis aporta una base empírica para caracterizar con mayor detalle la demanda de recarga, sus horarios de utilización y el potencial de flexibilidad asociado a distintos tipos de sesiones.

Cuestionamiento técnico: Se cuestiona la dependencia de fuentes de datos que a menudo funcionan como cajas negras o que son inaccesibles para el proyectista independiente. Aunque el *Big Data* ofrece una precisión teórica elevada, existe la necesidad de traducir estos flujos de información en variables territoriales tangibles. Esto motiva el desarrollo de una herramienta que simplifique la captura de datos sin perder el rigor necesario, convirtiendo la información disponible en criterios utilizables para la priorización territorial de zonas.

2.3.3. Variables predictoras y factores de atracción territorial

Para que un modelo de planificación sea útil, no basta con saber que existe una demanda de energía; el verdadero reto es identificar qué elementos del entorno actúan como imanes para los conductores. Entender estos factores de atracción es lo que permite pasar de una red basada en la intuición a una basada en datos territoriales sólidos. Por ello, se plantea:

¿Qué variables permiten aproximarla de forma fiable?

Elegir los indicadores correctos es lo que determina si un modelo es capaz de reflejar la realidad o si se queda en una simple estimación teórica. La investigación actual indica que la clave no está tanto en el vehículo en sí, sino en la actividad que genera el suelo que lo rodea:

Problemática: El uso de variables estáticas, como el parque de vehículos residentes, resulta insuficiente en entornos con alta variabilidad. En contextos con fuerte presencia turística, estos modelos presentan deficiencias graves al no considerar la atracción que ejercen las actividades económicas sobre el vehículo eléctrico.

Situación actual: El estado del arte muestra que los Puntos de Interés (POIs), los usos comerciales, las oficinas o los espacios de ocio pueden actuar como indicadores relevantes de atracción territorial. El uso del suelo se configura, así como una variable de interés para complementar otros indicadores de demanda.

Cuestionamiento técnico: Se cuestiona la validez de los censos tradicionales para entornos de población flotante. Se plantea la necesidad de integrar la atracción de los equipamientos urbanos como un componente adicional para aproximar la demanda potencial, asegurando que la infraestructura tenga una utilidad real y una ubicación estratégica.

2.4 Herramientas y metodología de planificación

El desarrollo de una red de recarga eficiente requiere de instrumentos que permitan armonizar los flujos de movilidad con las capacidades del sistema energético. Para comprender cómo la investigación actual aborda este reto, es necesario examinar los mecanismos que permiten transformar datos de comportamiento en decisiones espaciales y técnicas. A continuación, se plantean las cuestiones fundamentales que definen el marco metodológico del despliegue, proporcionando el contexto necesario para entender los paradigmas actuales de localización y dimensionamiento.

2.4.1. Paradigmas de localización y modelización espacial

No basta con decidir dónde colocar un cargador; es fundamental definir qué lógica espacial rige esa decisión. Dependiendo de si nos fijamos en un punto concreto, en una ruta de viaje o en las actividades del usuario, el resultado de la red será totalmente distinto. Por ello, surge la siguiente cuestión:

¿Qué enfoques espaciales (nodos, rutas o actividades) se emplean para modelar la localización de la infraestructura según la naturaleza de la demanda?

Comprender estos paradigmas es lo que permite elegir la metodología más adecuada para cada territorio. La ciencia actual clasifica estos enfoques según la forma en que entienden el movimiento del vehículo eléctrico y la relación del usuario con su entorno:

Problemática: La literatura muestra una evolución desde modelos geométricos simples hacia enfoques que relacionan la recarga con los patrones de movilidad, las rutas y las actividades del usuario. El reto es superar los planteamientos que tratan la carga como un acto aislado, integrándola en el ecosistema del transporte.

Situación actual: Actualmente, el estado del arte clasifica las opciones según el tratamiento de la movilidad:

- **Enfoques basados en nodos (*Node-based*):** Priorizan la cobertura territorial mediante modelos de localización clásica (MCLP) en puntos de parada estática.
- **Enfoques basados en rutas (*Path-based*):** Buscan interceptar flujos en corredores estratégicos para garantizar trayectos de larga distancia.
- **Enfoques basados en actividades (*Tour-based*):** Relacionan la recarga con las actividades y tiempos de permanencia del usuario, utilizando habitualmente datos GPS o Puntos de Interés (POIs).

Cuestionamiento técnico: Se cuestiona el uso de modelos de alta complejidad porque su implementación suele chocar con la falta de datos precisos, como trazas GPS individuales. Esto justifica la necesidad de explorar métodos de priorización espacial más operativos que utilicen variables accesibles como los POIs, asegurando una planificación transparente y basada en la realidad del territorio.

2.4.2. Optimización técnica e integración con la red eléctrica

La planificación de una red de recarga no termina con la elección del lugar ideal desde el punto de vista del transporte; es fundamental asegurar que esa ubicación sea compatible con la infraestructura energética. Un punto de carga solo es útil si la red eléctrica local puede suministrar la potencia necesaria sin poner en riesgo la estabilidad del sistema. Por ello, se plantea la siguiente cuestión:

¿Cómo se integran los algoritmos de optimización y los condicionantes de la red eléctrica en la planificación de la infraestructura de recarga?

Resolver este equilibrio requiere de herramientas matemáticas avanzadas que permitan coordinar el consumo de los vehículos con la capacidad disponible en los cables y transformadores. La investigación actual ha pasado de considerar la red como un elemento estático a tratarla como un componente activo y dinámico del sistema:

Problemática: El despliegue de infraestructura de recarga no es solo un reto de transporte, sino un desafío energético de primer orden. La problemática principal es que la carga no gestionada puede saturar los transformadores locales y provocar inestabilidad en el voltaje. El error más común en la planificación tradicional es tratar la red eléctrica constituye uno de los condicionantes técnicos que deben considerarse para valorar la viabilidad de una futura actuación.

Situación actual: Para resolver el equilibrio entre la demanda de los vehículos y la capacidad de los cables, la investigación actual utiliza algoritmos de optimización y metaheurísticas. Estas

herramientas permiten definir el tamaño y la potencia ideal de cada estación sin comprometer la red. El estado del arte identifica el *Smart Charging* o carga inteligente como una de las estrategias disponibles para modular la potencia en el tiempo, desplazar parte del consumo hacia periodos de menor carga y reducir la necesidad de determinados refuerzos de red.

Cuestionamiento técnico: El éxito de estos modelos depende de la calidad y nivel de detalle de la información eléctrica disponible. En contextos insulares y con elevada estacionalidad, resulta especialmente relevante incorporar las condiciones de la red desde las primeras fases de planificación. Cuando no se dispone de información suficiente para realizar un análisis eléctrico detallado, la capacidad publicada puede utilizarse como un indicador preliminar de oportunidad, cuya viabilidad deberá comprobarse posteriormente mediante los correspondientes estudios de acceso y conexión.

2.5 Segmentación tecnológica

Elegir el tipo de cargador adecuado no es solo una cuestión de presupuesto, sino de coherencia operativa. No tiene sentido instalar un equipo ultra-rápido donde el coche permanecerá aparcado ocho horas, ni uno lento donde el conductor solo dispone de quince minutos. Esta relación entre el tiempo y la potencia es lo que nos lleva a plantear la siguiente cuestión:

¿Cómo se determina el mix óptimo entre recarga lenta, rápida y ultra-rápida para evitar el sobredimensionamiento de la red y asegurar su eficiencia operativa?

Para que una red sea sostenible, cada punto de carga debe cumplir una función específica dentro de la rutina del usuario. La literatura relaciona cada vez más la potencia de recarga con la misión que debe cumplir la infraestructura y con el tiempo de permanencia del usuario:

Problemática: Existe un riesgo elevado de ineficiencia cuando no hay correspondencia entre la potencia instalada y el tiempo de estancia del usuario. Instalar carga rápida en lugares de estacionamiento prolongado genera un estrés innecesario en la red eléctrica y eleva los costes de inversión sin aportar un valor real. El problema reside en la necesidad de relacionar adecuadamente la potencia de recarga con la función de la infraestructura y el tiempo de permanencia previsto del usuario.

Situación actual: La literatura científica estructura actualmente el despliegue en torno a cuatro escenarios fundamentales que definen el mix tecnológico:

- **Recarga local (ámbito urbano):** Enfocada al residente sin aparcamiento propio, priorizando la carga cotidiana de baja potencia.

- **Recarga en destino (uso del suelo):** Vinculada a Puntos de Interés (POIs) como hoteles o centros comerciales, donde la potencia (semirrápida) se ajusta al tiempo de estancia del usuario.
- **Recarga de flotas:** Diseñada para servicios de alta intensidad como el transporte público o los vehículos de alquiler (*rent-a-car*), con requerimientos específicos de rotación.
- **Demanda interurbana:** Centrada en carga rápida y ultra-rápida en corredores para mitigar la ansiedad de autonomía en trayectos largos.

Estas categorías funcionales sirven como referencia para la posterior estructuración del modelo, sin que todas ellas se traduzcan necesariamente en una salida independiente.

Cuestionamiento técnico: Esta interrogante se plantea porque la potencia y la función de la infraestructura deben guardar relación con el perfil de utilización y el tiempo de estancia del usuario. Esta segmentación resulta útil para diferenciar las distintas necesidades de recarga, aunque la selección de la tecnología y potencia concretas corresponde a una fase posterior de dimensionamiento y diseño de cada instalación.

2.6 Análisis comparado de estrategias y marco regulatorio

Antes de analizar cómo se comporta la demanda y qué herramientas existen para planificar la infraestructura, resulta necesario comprender bajo qué marcos estratégicos y de gobernanza se toman estas decisiones en los países líderes.

El despliegue de la infraestructura de recarga no constituye únicamente un problema técnico de localización o dimensionamiento, sino que se encuentra fuertemente condicionado por marcos estratégicos y regulatorios que orientan las decisiones de inversión, los modelos de gobernanza y la integración con el sistema energético. En los últimos años, estos marcos han evolucionado desde enfoques basados principalmente en incentivos económicos hacia modelos más integrales, que incorporan objetivos de interoperabilidad, estabilidad de la red, calidad del servicio y coordinación entre actores públicos y privados. Esta evolución refleja una transición desde planteamientos reactivos, basados en la oportunidad, hacia enfoques de planificación proactiva apoyados en la capacidad de la red y la gestión del suelo.

En este contexto, el presente apartado desarrolla un análisis comparado entre el marco europeo y español y los enfoques adoptados en países líderes en movilidad eléctrica, con el objetivo de identificar tendencias comunes, diferencias relevantes y principios de planificación transferibles. Este enfoque comparativo permite extraer conclusiones sobre el estado del arte en la planificación estratégica de la infraestructura de recarga, más allá de las particularidades

normativas de cada país, y establecer un marco de referencia que sirve de base para la identificación de criterios metodológicos aplicables al caso de estudio.

2.6.1. El eje estratégico europeo: AFIR como estándar de interoperabilidad y servicio

El marco europeo de referencia para el despliegue de la infraestructura de recarga se articula en torno al Reglamento (UE) 2023/1804, relativo a la implantación de infraestructuras para combustibles alternativos (AFIR). Este reglamento ha supuesto un cambio sustancial al transformar un despliegue basado principalmente en iniciativas voluntarias en un servicio armonizado a escala europea, sujeto a requisitos técnicos y operativos comunes.

La relevancia del AFIR reside en que sitúa la calidad del servicio y la experiencia del usuario como ejes centrales del despliegue de la infraestructura de recarga, estableciendo un conjunto de obligaciones que refuerzan la interoperabilidad y la fiabilidad del sistema. En este sentido, el reglamento se apoya en tres pilares técnicos fundamentales:

- **Transparencia e información dinámica.** El AFIR establece la obligación de que los operadores proporcionen información en tiempo real sobre la disponibilidad de los puntos de recarga, los precios aplicables y la potencia suministrada. Esta exigencia resulta esencial para el desarrollo de herramientas de navegación, planificación de rutas y gestión de flotas, al reducir la incertidumbre asociada al uso de la infraestructura.
- **Accesibilidad y pago universal.** Se impone la obligatoriedad de ofrecer métodos de pago electrónicos, como tarjetas de crédito o débito, sin necesidad de contratos previos ni aplicaciones propietarias. Este requisito garantiza la interoperabilidad de la red y el acceso no discriminatorio a la infraestructura de recarga, facilitando la itinerancia transfronteriza dentro del mercado europeo.
- **Objetivos de cobertura y potencia crítica.** Con el fin de asegurar la continuidad del servicio en desplazamientos de larga distancia, el reglamento fija requisitos específicos de cobertura en la red transeuropea de transporte (TEN-T), orientados a mitigar la denominada ansiedad de autonomía:
    - **Red básica:** disponibilidad de estaciones de recarga de alta potencia, con una potencia acumulada mínima de 350 kW, cada 60 km antes de 2030.
    - **Red global:** implantación de estaciones de recarga al menos cada 100 km, garantizando una cobertura capilar del territorio europeo.

2.6.2. Estrategias nacionales específicas de infraestructura de recarga

Mientras que el marco europeo establecido define unos requisitos mínimos de carácter técnico y de servicio, la ejecución efectiva del despliegue depende de las estrategias nacionales, que

abordan de manera diferenciada aspectos como las barreras administrativas, la disponibilidad de suelo y la capacidad de la red eléctrica. A partir del análisis comparado, pueden identificarse tres enfoques estratégicos consolidados que resultan de especial interés como referencia para el caso español.

2.6.2.1. Modelo de madurez y simplificación (Noruega).

El modelo noruego, formalizado en la *National Charging Strategy* (2022–2023), constituye un referente de transición desde un despliegue inicialmente asistido hacia un ecosistema caracterizado por la madurez del mercado y la estabilidad regulatoria. Esta madurez es fruto de una combinación sostenida de incentivos fiscales y reducción de fricciones de uso que, según Bjerkan et al. (2016), han sido críticos para la adopción masiva, destacando que la reducción del precio de compra (exenciones de IVA y tasas) fue el factor determinante para los usuarios pioneros.

Uno de los pilares fundamentales del modelo noruego es la reducción de barreras para la adopción del vehículo eléctrico mediante un apoyo público sostenido, incentivos y el desarrollo de una infraestructura de recarga extensa. Según el análisis comparativo de De Miguel Muñoz et al. (2023), este fuerte apoyo gubernamental y el desarrollo de la infraestructura contrastan con las dificultades observadas en España, donde la complejidad regulatoria y las limitaciones de la red de recarga continúan condicionando la adopción del vehículo eléctrico.

Asimismo, el modelo se apoya en una planificación geoespacial basada en evidencias. Investigaciones como la de Schulz y Rode (2021) muestran el valor de este enfoque al identificar que, en los municipios analizados, mayoritariamente rurales, la implantación de la primera infraestructura pública de recarga se asocia con un aumento medio de 1,5 puntos porcentuales en la tasa local de propiedad de vehículos eléctricos, equivalente aproximadamente a un 200 % en cinco años. Los autores identifican así la infraestructura pública de recarga como un estímulo para la difusión del vehículo eléctrico.

En conjunto, estos elementos reflejan un modelo apoyado en el despliegue de infraestructura pública y en la disponibilidad de información abierta sobre la red de recarga. Schulz y Rode (2021) muestran que la implantación de infraestructura pública puede actuar como estímulo para la adopción del vehículo eléctrico, mientras que NOBIL centraliza y pone a disposición pública información detallada sobre los puntos de recarga mediante una API abierta (NOBIL, s. f.).

2.6.2.2. Modelo de planificación integral y de escala (Alemania).

El modelo alemán, fundamentado en el *Masterplan Ladeinfrastruktur II* (Federal Ministry for Digital and Transport, 2022), constituye uno de los enfoques más estructurados en materia de

planificación y ampliación de la infraestructura de recarga. Su estrategia no se limita a la instalación de nuevos puntos, sino que se apoya en una gobernanza centralizada a través del *National Centre for Charging Infrastructure* (*Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur*). Este organismo coordina la transición desde un despliegue apoyado inicialmente por subvenciones públicas (*jump-start*) hacia un sistema en el que la inversión privada y la competencia adquieren un papel cada vez mayor, reduciendo progresivamente la intervención pública a medida que el mercado alcanza un mayor grado de madurez (Loehr & Hanken, 2025).

La operatividad de este marco se sustenta en instrumentos de planificación basados en datos, como el StandortTOOL 2.0, que permite coordinar el despliegue territorial con la demanda prevista y las necesidades de desarrollo de la infraestructura (Federal Ministry for Digital and Transport, 2022). Por otra parte, Mortimer, Bach, et al. (2022), mediante el análisis de 21.164 puntos de recarga públicos y semipúblicos en Alemania, muestran la importancia de la utilización y de los costes de instalación y operación para su viabilidad económica. Bajo escenarios de crecimiento de la movilidad eléctrica del 20-30 % anual, el estudio identifica un número creciente de parques de recarga potencialmente viables en áreas urbanas.

Este marco integra varios pilares clave, como la movilización de suelo público, la adaptación de la normativa de edificación mediante la Ley GEIG y sistemas avanzados de monitorización para mitigar saturaciones (Federal Ministry for Digital and Transport, 2022). Bajo esta concepción, la expansión se diferencia técnicamente entre la recarga de oportunidad y larga distancia (DC) y la recarga vinculada urbana (AC), permitiendo que la infraestructura funcione como un elemento activo del sistema energético. Esta segmentación asegura que la red sea capaz de adaptarse a la evolución de la demanda de forma eficiente, evitando el despliegue de infraestructuras sobredimensionadas en zonas de baja rotación (Mortimer, Bach, et al., 2022).

2.6.2.3. Modelo de interoperabilidad y cooperación multinivel (Países Bajos).

El modelo neerlandés se articula en torno a la *Nationale Agenda Laadinfrastructuur* (NAL), una estrategia que aborda el despliegue de la infraestructura de recarga desde una planificación coordinada entre los distintos actores implicados. La agenda plantea como objetivo que la disponibilidad de infraestructura no constituya una barrera para la expansión del vehículo eléctrico y combina medidas orientadas a garantizar una cobertura suficiente, anticipar nuevas necesidades mediante la planificación estratégica y reducir el impacto de la recarga sobre la red eléctrica (Nationale Agenda Laadinfrastructuur, 2019). La propia NAL establece una estructura de coordinación en la que participan la administración central, los municipios y provincias, los operadores de red y diferentes agentes del mercado. La elaboración de la agenda también contó

con representantes de operadores de red, empresas energéticas, fabricantes, operadores de recarga, municipios y regiones.

Otro elemento relevante del modelo neerlandés es la interoperabilidad. La NAL plantea el uso de protocolos abiertos y la cooperación entre administraciones, operadores de red y agentes del mercado como parte del desarrollo de un sistema abierto y competitivo. Esta orientación se observa también en la experiencia acumulada por las principales ciudades neerlandesas. Van den Hoed et al. (2019) destacan la importancia de los estándares interoperables en el desarrollo de la red pública y recogen el uso de OCPP (*Open Charge Point Protocol*) y OCPI (*Open Charge Point Interface*) para facilitar la operación y el intercambio estandarizado de información entre los distintos agentes del sistema.

La expansión de la infraestructura pública también ha seguido una lógica progresivamente vinculada a la demanda. En las primeras etapas se instalaron puntos en localizaciones consideradas estratégicas, mientras que el aumento de usuarios dependientes del estacionamiento en vía pública llevó a desarrollar mecanismos mediante los cuales los conductores podían solicitar la instalación de un punto próximo a su domicilio, manteniendo este su carácter público (Van den Hoed et al., 2019). Esta estrategia permitió responder a necesidades reales de recarga y convivió posteriormente con emplazamientos definidos de forma estratégica. Los análisis posteriores refuerzan esta orientación basada en datos: Wolbertus (2024) muestra que la combinación de información geográfica con indicadores de utilización y rendimiento de la red existente permite mejorar la priorización de futuras ampliaciones.

La integración con el sistema eléctrico constituye otra de las líneas de evolución del modelo. En 2022, la NAL desarrolló el programa *Smart Charging for All 2022–2025*, orientado a extender la recarga inteligente y adaptar la demanda de los vehículos eléctricos a las condiciones de la red (Nationale Agenda Laadinfrastructuur, 2022). El programa planteaba que la recarga inteligente se convirtiera en el estándar para la recarga de destino y establecía mecanismos de coordinación entre regiones, operadores de red, operadores de puntos de recarga y otros agentes de la cadena. Entre las medidas previstas se encontraba el intercambio de información sobre la capacidad disponible de la red y la adaptación temporal de la potencia de carga cuando existieran restricciones, introduciendo así una mayor flexibilidad en la gestión de la infraestructura.

2.6.3. El caso español: marco habilitador y brecha estratégica

A diferencia de los países analizados en el apartado anterior, el caso español no se articula en torno a una estrategia nacional específica dedicada a la planificación del despliegue de la infraestructura de recarga. En su lugar, el marco español se configura a partir de un conjunto de instrumentos estratégicos y normativos de carácter general que actúan como habilitadores del despliegue, pero no como una estrategia integrada y dedicada.

En este contexto, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023–2030 desempeña el papel de instrumento integrador a escala estatal. El PNIEC asume los objetivos establecidos por el marco europeo y establece las líneas estratégicas nacionales relacionadas con la movilidad eléctrica y el sistema energético (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024). No obstante, su enfoque es de carácter transversal y agregado, sin descender al nivel operativo de planificación específica de la infraestructura de recarga.

Para dotar de operatividad a este marco general, el modelo nacional se apoya en un conjunto de normativas que abordan los aspectos técnicos, administrativos y territoriales del despliegue, configurando un entorno regulatorio que facilita la implantación de infraestructura, pero traslada a otros niveles de decisión la definición de criterios de localización, dimensionamiento y priorización de actuaciones.

- **Regulación de la Actividad:** El Real Decreto 184/2022 define jurídicamente la prestación del servicio de recarga.
- Facilitación de Infraestructura: El Real Decreto-ley 23/2020 declara de utilidad pública las infraestructuras eléctricas de las estaciones de recarga de potencia superior a 250 kW, mientras que el Real Decreto-ley 29/2021, de 21 de diciembre, agiliza determinados trámites mediante la declaración responsable.
- **Vínculo Urbano:** El Real Decreto 1052/2022 conecta la infraestructura con las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE), garantizando que el despliegue responda a la planificación de movilidad urbana.

2.6.3.1. El Modelo Autonómico Balear: Una gobernanza autonómica proactiva

Mientras que el marco nacional se orienta principalmente al fomento del despliegue y a la simplificación administrativa, el caso de las Illes Balears constituye un ejemplo de gobernanza avanzada dentro de un marco nacional habilitador. En este contexto, la comunidad autónoma ha desarrollado un modelo propio caracterizado por un mayor grado de intervención normativa y de planificación estratégica del despliegue de la infraestructura de recarga.

Este modelo se articula fundamentalmente a través de la Ley 10/2019, de Cambio Climático y Transición Energética, cuyo Capítulo II establece el marco regulador específico para la implantación de infraestructura de recarga en Mallorca. A diferencia del enfoque estatal, de

carácter más transversal, la normativa autonómica introduce obligaciones directas y criterios de planificación que inciden de forma explícita en la generación de demanda, la integración con la red eléctrica y la vinculación con el uso del suelo.

Generación de demanda y la renovación de flotas (artículo 63)

La normativa autonómica introduce la obligación de renovación progresiva de flotas públicas y de determinadas flotas privadas hacia vehículos de cero emisiones. Desde el punto de vista de la planificación de infraestructuras, esta medida genera una demanda estructural y predecible, asociada a patrones de uso intensivo, que requiere un enfoque de dimensionamiento distinto al de la demanda residencial o individual.

En concreto, el apartado 2 de este artículo obliga al sector del alquiler de vehículos a cumplir con un calendario de adquisición progresivo. Como detalla la Tabla 1, esta exigencia evoluciona desde un mínimo del 2 % de las adquisiciones en 2020 hasta alcanzar el 100 % de las nuevas adquisiciones en 2035, año en el que el porcentaje mínimo sobre el conjunto de la flota se sitúa en el 30 %. Sumado a la obligación administrativa de reportar anualmente estas unidades (apartado 4), esta normativa permite anticipar una presión creciente de electrificación asociada al sector del alquiler de vehículos, que deberá ser considerada en la planificación futura de la infraestructura y de la red eléctrica.

Año de renovación	Porcentaje mínimo de adquisición de unidades	Porcentaje mínimo sobre el número total de unidades de la flota
2020	2%	0,6%
2021	4%	1,2%
2022	6%	1,8%
2023	9%	2,7%
2024	12%	3,6%
2025	17%	5,1%
2026	22%	6,6%
2027	28%	8,4%
2028	35%	10,5%
2029	42%	12,6%
2030	50%	15,0%
2031	58%	17,4%
2032	68%	20,4%
2033	78%	23,4%
2034	88%	26,4%
2035	100%	30,0%

Tabla 1 Anexo de la Ley 10/2019, de 22 de febrero, de cambio climático y transición energética de las Illes Balears. Fuente: Ley 10/2019, de 22 de febrero. Elaboración propia.

Planificación estratégica e integración con la red eléctrica (artículo 64)

Este artículo establece que el despliegue de infraestructura de recarga debe considerar explícitamente la capacidad de la red de distribución eléctrica y la necesidad de su refuerzo progresivo. Asimismo, impone la integración de todos los puntos de recarga de acceso público, independientemente de su titularidad, en el sistema MELIB, gestionado por *el Institut Balear de l'Energia* (IBE). Este esquema de interoperabilidad centralizada facilita la agregación y el análisis de datos de uso, lo que supone una ventaja relevante desde la perspectiva de la planificación basada en información empírica.

Reservas de espacio y vinculación con el uso del suelo (artículos 65 y 66).

El marco autonómico introduce obligaciones urbanísticas específicas, como la reserva de plazas para vehículos de cero emisiones y la exigencia de dotaciones mínimas de puntos de recarga en aparcamientos no residenciales y edificios de nueva construcción. Esta integración directa entre infraestructura de recarga y edificación permite anticipar la demanda urbana y reducir el riesgo de déficit estructural de puntos de recarga en áreas densas.

Este cuerpo normativo se complementa con el Plan de Inversiones para la Transición Energética de las Illes Balears (PITEIB), que fija objetivos cuantitativos y dota de recursos económicos al despliegue de la infraestructura de recarga, entre ellos el objetivo de alcanzar 2.000 puntos públicos en 2025 (Govern de les Illes Balears, 2022). El PITEIB actúa como un instrumento estratégico que refuerza la necesidad de disponer de herramientas avanzadas de apoyo a la toma de decisiones, capaces de priorizar actuaciones y optimizar la asignación de inversiones en un contexto de recursos limitados.

2.6.4. Síntesis del análisis comparado e implicaciones para la planificación

En conjunto, el análisis comparado pone de manifiesto que el estado del arte en la planificación de la infraestructura de recarga se caracteriza, en los países líderes, por la existencia de estrategias específicas, modelos de gobernanza claramente definidos y una integración efectiva entre planificación energética, territorial y de la demanda. Frente a este escenario, el caso español se apoya en un marco habilitador distribuido entre distintos instrumentos estratégicos y normativos, en el que la planificación detallada del despliegue queda descentralizada y, en gran medida, condicionada por la capacidad de los distintos niveles administrativos para integrar criterios técnicos, territoriales y energéticos.

En este contexto, el modelo autonómico balear representa un caso singular dentro del marco nacional, al incorporar elementos avanzados de planificación estratégica, generación de demanda y gestión de datos. No obstante, incluso en este escenario más favorable, la complejidad del proceso de toma de decisiones y la necesidad de priorizar actuaciones en un entorno de recursos limitados ponen de relieve la conveniencia de disponer de herramientas

metodológicas que permitan evaluar de forma integrada la demanda, la capacidad de la red y el territorio. Esta necesidad constituye el punto de partida para el desarrollo metodológico abordado en los capítulos siguientes.

2.7 Caracterización de la demanda y perfiles de usuario

Una vez establecido el marco regulatorio, resulta necesario comprender la naturaleza de la demanda. La decisión de recarga depende del tipo de usuario, el lugar, el momento y la actividad desarrollada, por lo que su caracterización constituye un elemento previo para la planificación de la infraestructura.

2.7.1. Perfiles de usuario y comportamiento de recarga

La caracterización de la demanda de carga ha dejado de abordarse en la literatura como una variable estática o promedial para reconocerse como un sistema complejo y estocástico. La investigación actual ha abandonado las encuestas de preferencia declarada para adoptar enfoques basados en datos masivos (*data-driven*), permitiendo modelar no solo *cuándo* se conecta el usuario, sino *por qué* elige una ubicación y *cuánta* flexibilidad ofrece al sistema.

2.7.2. Caracterización basada en datos (Agrupamiento espaciotemporal)

El análisis de grandes volúmenes de datos reales permite identificar patrones temporales de recarga que no son visibles mediante promedios agregados. Märtz et al. (2022), mediante el análisis de aproximadamente 2,6 millones de procesos de recarga y la aplicación de técnicas de *clustering*, identifican distintos patrones temporales, entre los que destaca una presencia significativa de recarga de oportunidad durante el día junto con los patrones de recarga nocturna.

Sin embargo, este comportamiento temporal también se relaciona con las características del entorno. Adenaw y Krapf (2022), a partir de datos reales de infraestructura pública, observan curvas temporales de ocupación diferenciadas entre distintos tipos de localización y destacan factores como los Puntos de Interés (POIs), el uso del suelo y las características de permanencia entre las variables relevantes para caracterizar la utilización de los cargadores.

2.7.3. Factores determinantes: Propiedad y Distancia

El proceso de decisión del usuario para elegir dónde cargar depende de variables físicas y psicológicas críticas:

- **Disponibilidad de recarga vinculada:** Tian et al. (2023) muestran diferencias relevantes en el comportamiento de carga según la disponibilidad de un punto privado. Los usuarios

con PCP presentan intervalos más prolongados entre recargas, mientras que los usuarios sin PCP cargan con mayor frecuencia, tienden a iniciar la recarga con un SOC inferior y presentan mayor ansiedad asociada a la autonomía.

- **Distancia al destino:** Para la carga fuera del hogar, Adenaw y Lienkamp (2021) modelan la decisión como un proceso co-evolutivo donde el usuario optimiza su elección ponderando la disponibilidad y, críticamente, la distancia a pie (*walking distance*) hasta su destino final.
- **Percepción de disponibilidad:** Charly et al. (2023) señalan que la disponibilidad de infraestructura de recarga resulta especialmente relevante en los desplazamientos de larga distancia, donde la existencia de puntos de recarga a lo largo de los principales corredores contribuye a reducir las limitaciones asociadas a la autonomía del vehículo.

2.7.4. Modelado de la Flexibilidad (Tiempo de Conexión vs. Energía)

Desde la perspectiva de la integración en red, resulta relevante distinguir entre el tiempo durante el cual el vehículo permanece conectado y el tiempo estrictamente necesario para suministrar la energía requerida. Gerossier et al. (2019) analizan datos de consumo de vehículos eléctricos registrados con alta resolución temporal y modelan los hábitos de recarga a partir de variables como la hora de inicio y la duración de la sesión, identificando distintos grupos de comportamiento que posteriormente utilizan para la previsión de perfiles de consumo.

Cañigueral (2023) desarrolla esta dimensión desde la perspectiva de la flexibilidad, definiendo el margen disponible entre el tiempo de conexión y el tiempo efectivo de carga. A partir de datos reales, identifica perfiles con tiempos de conexión significativamente superiores al tiempo necesario para completar la recarga, especialmente en usuarios asociados al trabajo y a conexiones prolongadas durante la tarde y la noche. Este margen permite desplazar temporalmente parte de la demanda sin modificar necesariamente la energía suministrada al usuario.

No obstante, el aprovechamiento de esta flexibilidad técnica también depende de la aceptación del usuario. Henriksen et al. (2021) muestran que la disposición hacia la carga inteligente y la flexibilidad no responde únicamente a incentivos económicos, sino también a factores como la seguridad, el interés tecnológico, las ventajas prácticas y el confort.

2.7.5. Taxonomía funcional en contextos de alta movilidad

La literatura muestra la utilidad de diferenciar la infraestructura según la función o misión de recarga del usuario. Esta diferenciación resulta especialmente relevante en contextos donde conviven residentes y usuarios flotantes, como ocurre en territorios turísticos. Raveendran et al. (2020) incorporan en el caso de Menorca escenarios de recarga asociados a vehículos turísticos en hoteles, restaurantes y playas. Por su parte, Tian et al. (2023) muestran que los usuarios sin punto de recarga privado presentan una mayor frecuencia de recarga que aquellos que disponen de él.

A partir de la diferenciación funcional recogida por Figenbaum et al. (2022), Zhang et al. (2018) y Charly et al. (2023), se adopta la siguiente taxonomía para la planificación:

- **Carga Vinculada (Residencial/Trabajo):** Prioriza la gestión de la flexibilidad (Cañigueral, 2023) sobre la velocidad.
- **Carga de Destino (Oportunidad):** Ubicada en POIs, donde la potencia puede relacionarse con el tiempo de estancia medio de la actividad (Adenaw & Krapf, 2022).
- **Carga de Rotación (En Ruta):** Alta potencia (>50kW) en corredores y *hubs*, crítica para usuarios sin base fija o con alta sensibilidad al tiempo que requieren minimizar la espera.

En conclusión, la naturaleza estocástica de la demanda, dictada por la misión de carga y la interacción con los POIs, invalida el uso de heurísticas simples o promedios estáticos. El desafío técnico reside, por tanto, en operacionalizar esta complejidad conductual mediante modelos matemáticos formalizados.

A continuación, se analizan las metodologías de optimización espacial existentes en el estado del arte, capaces de traducir estos patrones de comportamiento heterogéneos en decisiones de ubicación robustas.

2.8 Metodologías de planificación y localización de infraestructura

Comprendida la complejidad del comportamiento del usuario y la necesidad de flexibilidad descrita en los apartados anteriores, este bloque revisa las herramientas matemáticas y algorítmicas disponibles en la literatura para abordar la planificación de la infraestructura. Se analizan las metodologías capaces de traducir los patrones de comportamiento y movilidad (*input*) en decisiones de localización, cobertura o priorización espacial (*output*).

En la última década se ha desarrollado una literatura técnica y científica orientada al análisis de la planificación de la infraestructura de recarga para vehículos eléctricos (VE), que integra movilidad, territorio, energía y comportamiento del usuario. Revisiones sistemáticas como las de Metais et al. (2022) y Pagany, Ramirez Camargo, et al. (2019) coinciden en clasificar los enfoques existentes en tres grandes categorías espaciales, según cómo se modelan los patrones de movilidad y la demanda de recarga. Esta revisión sirve de base para la definición del enfoque

metodológico adoptado en el presente caso de estudio. A continuación, se presentan los enfoques metodológicos predominantes clasificados según su perspectiva espacial y operativa:

2.8.1. Enfoques basados en nodos (*Node-based approaches*):

En los enfoques basados en nodos, la demanda de recarga se modela como un conjunto de puntos discretos distribuidos en el territorio, tales como hogares, centros de trabajo, equipamientos o celdas de alta densidad. El objetivo principal es identificar ubicaciones que maximicen la cobertura territorial o minimicen la distancia de acceso. Para ello, la literatura técnica recurre a diversas familias de modelos:

- **Modelos de Cobertura (*MCLP*):** Constituyen uno de los enfoques clásicos en la planificación, cuyo objetivo es maximizar la demanda atendida dentro de un radio de servicio predefinido, generalmente bajo restricciones presupuestarias. El estudio seminal de Frade et al. (2011) aplicó el *Maximal Covering Location Problem* al caso de Lisboa, demostrando que la diferenciación entre nodos de demanda nocturna (residencial) y diurna (laboral) resulta clave para maximizar el nivel de servicio público con un número limitado de estaciones.
- **Evolución hacia la accesibilidad y viabilidad técnica:** Para superar las limitaciones de los modelos puramente geométricos, Deb et al. (2019) propusieron un modelo híbrido que integra las restricciones impuestas por la red eléctrica. Su aportación reside en la introducción de un proceso de cribado previo mediante redes bayesianas, que permite descartar ubicaciones con elevada probabilidad de inestabilidad de tensión o congestión de tráfico antes de la optimización, mejorando la viabilidad técnica de las soluciones obtenidas.
- **Dimensionamiento mediante Teoría de Colas:** Una vez seleccionadas las ubicaciones óptimas, el reto metodológico es el dimensionamiento de la infraestructura. Zhu et al. (2017) integran la teoría de colas, mediante modelos *M/M/s*, en la función objetivo de planificación. Este enfoque permite minimizar el coste total de inversión garantizando que el tiempo de espera de los usuarios no supere un umbral crítico, equilibrando la rentabilidad del operador con la calidad del servicio ofrecido.
- **Integración GIS y Análisis Multicriterio (*S-MCDA*):** Una vertiente muy extendida en la planificación urbana combina los Sistemas de Información Geográfica con técnicas de decisión multicriterio. Güler y Yomralıoğlu (2020) integran GIS con los métodos AHP y *fuzzy* AHP para ponderar criterios territoriales y generar mapas de aptitud para la localización de estaciones de recarga. Posteriormente, utilizan TOPSIS para jerarquizar las alternativas seleccionadas. Este enfoque permite integrar en un mismo análisis

variables espaciales de distinta naturaleza, como densidad de población, accesibilidad viaria, proximidad a estaciones de transporte, aparcamientos, estaciones de servicio, pendiente y valor del suelo.

- **Aplicaciones avanzadas y sostenibilidad:** Erbaş et al. (2018) proponen una metodología de decisión multicriterio integrada en GIS para evaluar localizaciones potenciales de estaciones de recarga. El procedimiento combina 15 criterios geográficos, su representación espacial mediante GIS, la ponderación de los criterios mediante fuzzy AHP y la posterior jerarquización de las alternativas mediante TOPSIS.
- **Optimización de la recarga comunitaria:** El trabajo de Charly et al. (2023) consolida esta tendencia al utilizar herramientas *GIS* de código abierto para priorizar zonas según la función de la infraestructura basadas en la clasificación funcional de la infraestructura: carga residencial compartida, en ruta (*en-route*) y en destino (*destination*). Su metodología integra criterios sociodemográficos y patrones de viaje para priorizar instalaciones en entornos urbanos de alta densidad, transformando variables territoriales complejas en resultados transparentes de apoyo a la planificación.

  En este trabajo, el ámbito de estudio se subdivide en celdas de 1 km², que actúan como unidad espacial común para integrar y comparar las distintas variables territoriales.

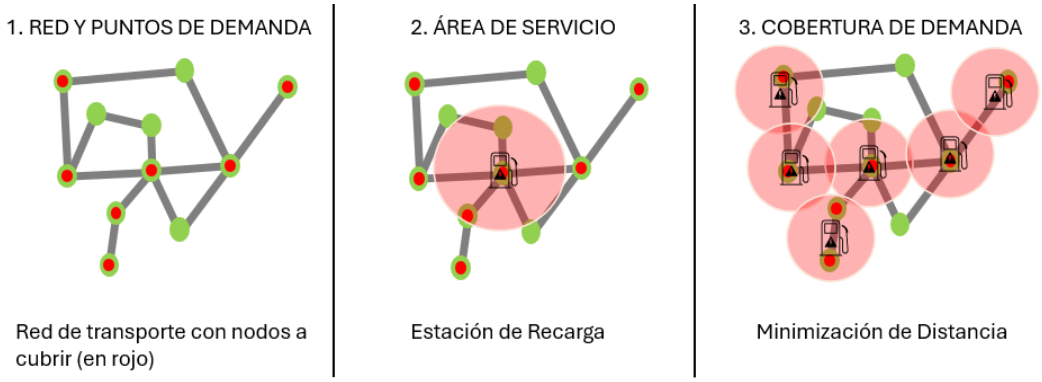


Figura 4 Principio simplificado de un enfoque basado en nodos. Fuente: Metais et al. (2022). Elaboración propia.

2.8.2. Enfoques basados en rutas (*Path-based approaches*):

En los enfoques basados en rutas, la planificación de la infraestructura de recarga se realiza a partir del análisis de los flujos de desplazamiento a lo largo de la red viaria. A diferencia de los modelos basados en nodos, de carácter estático, estos enfoques se centran en la interceptación de flujos de movilidad, optimizando la localización de estaciones en corredores estratégicos con el objetivo de garantizar que los vehículos puedan completar trayectos de media y larga distancia sin incurrir en situaciones críticas de autonomía. La literatura académica ha evolucionado progresivamente hacia modelos

más complejos que integran de forma explícita las restricciones de la red eléctrica y el comportamiento de los distintos tipos de usuarios:

- **Fundamentos de captura de flujo y la brecha teórico-práctica:** El fundamento de los enfoques basados en rutas se remonta al *Flow-Capturing Location Model* (FCLM) propuesto por Hodgson (1990), que representa la demanda mediante flujos origen-destino y localiza un número determinado de instalaciones con el objetivo de maximizar el flujo capturado. Motoaki (2019) identifica posteriormente una brecha entre la investigación y la práctica, señalando que, aunque los enfoques de captura de flujo son frecuentes en la literatura sobre carga rápida, existe poca evidencia de su aplicación real, donde también se observan estrategias basadas en nodos.
- **Adaptación al vehículo eléctrico y capacidad (*FRLM* y *CFRLM*):** Para superar las limitaciones del *FCLM* original, que no incorporaba la autonomía del vehiculo, Kuby y Lim (2005) desarrollaron el *Flow-Refueling Location Model* (*FRLM*). Su aportación principal fue introducir la lógica del repostaje necesario, garantizando combinaciones de estaciones espaciadas dentro del rango operativo del vehículo. Para abordar la limitación de estaciones de capacidad infinita, Zhang et al. (2018) propusieron el *Capacitated Flow-Refueling Location Model* (CFRLM), que incorpora los flujos origen-destino, la autonomía del vehículo y la capacidad de servicio de las estaciones, y lo integra posteriormente con las restricciones de la red eléctrica para optimizar conjuntamente la localización y el dimensionamiento de la infraestructura.
- **Integración de la dinámica temporal y estocasticidad:** Ji et al. (2025) desarrollan un modelo de planificación que incorpora información dinámica del tráfico para estimar la distribución espacio-temporal de la demanda de recarga. Esta predicción se integra posteriormente en la localización y dimensionamiento de las estaciones, considerando además restricciones derivadas de la red de distribución.
- **Enfoques híbridos (*Hybrid approaches*):** La literatura reciente muestra una evolución hacia modelos que incorporan condicionantes espaciales y de planificación urbana. Desarrollos como el de Huang et al. (2016) integran en un mismo marco la demanda asociada a áreas urbanas para la carga lenta y los flujos sobre la red viaria para la carga rápida, permitiendo representar distintos tipos de necesidad de recarga. En esta línea, He et al. (2022) proponen un modelo de localización y asignación contextualizado para entornos urbanos de alta densidad. Su aportación reside en integrar la disponibilidad y capacidad física de los emplazamientos potenciales, la distribución espacial de la demanda y diferentes condicionantes derivados de la planificación pública, poniendo de manifiesto la importancia de adaptar los modelos de localización al contexto territorial.

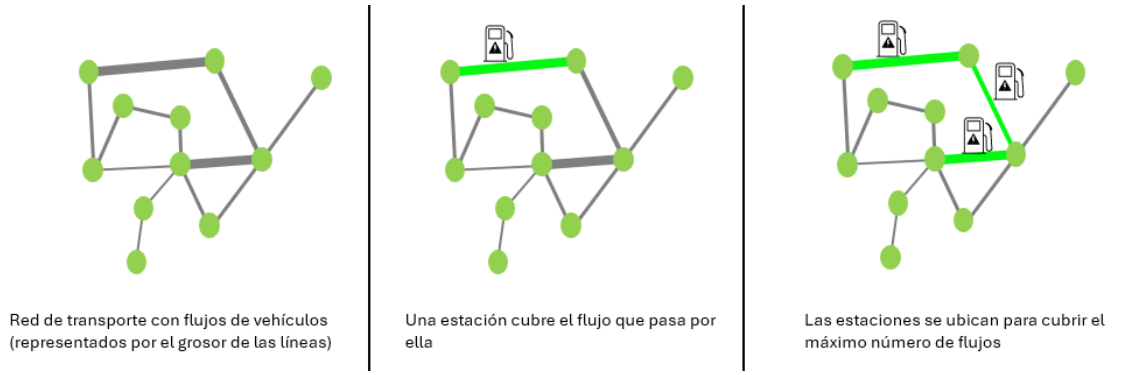


Figura 5 Principio simplificado de un enfoque basado en trayectorias. Fuente: Metais et al. (2022). Elaboración propia.

2.8.3. Enfoques basados en actividades y recorridos (*Tour/activity-based approaches*)

Los enfoques basados en actividades analizan la secuencia de desplazamientos y paradas del usuario al analizar la secuencia completa de desplazamientos diarios del individuo. A diferencia de los modelos anteriores, estos utilizan datos masivos de trayectorias (*GPS*) o Puntos de Interés (*POIs*) para estudiar la demanda de recarga como una necesidad derivada que debe encajar en los tiempos de parada naturales del usuario (hogar, trabajo o ocio), en lugar de forzar paradas exclusivas para el repostaje. La literatura técnica distingue diversas estrategias según el tipo de datos disponibles y el objetivo de la planificación:

- **Viabilidad de la cadena de actividades (Residentes):** Dong et al. (2014) utilizan datos de movilidad GPS de varios días para desarrollar un modelo que integra los patrones diarios de viaje y las restricciones de autonomía en la planificación de cargadores públicos. Sus resultados muestran que la instalación de infraestructura en destinos donde los vehículos permanecen estacionados durante las actividades del usuario puede reducir los viajes limitados por autonomía y aumentar las distancias recorridas en modo eléctrico.
- **Modelos basados en destinos y POIs (Turismo y servicios):** Wagner et al. (2014) analizan en Ámsterdam la utilización de los puntos de recarga a partir de su relación con distintos Puntos de Interés (POIs), como museos, comercios y otros centros de actividad. Sobre esta base, el modelo *Electric Charging Demand Location* (*ECDL*), propuesto por Pagany, Marquardt, et al. (2019), utiliza la densidad de *POIs* y los tiempos de estancia promedio para aproximar la demanda asociada a los destinos. Recientemente, Mortimer, Hecht, et al. (2022) reforzaron este planteamiento mediante el análisis de datos reales de carga en Alemania, mostrando que la presencia y tipología de equipamientos urbanos aporta información relevante para explicar la utilización de la infraestructura cuando no se dispone de trazas GPS individuales.

- **Maximización de millas eléctricas (Flotas y alta rotación):** Shahraki et al. (2015) desarrollan un modelo de optimización basado en patrones reales de movilidad para seleccionar la localización de estaciones públicas de recarga. Aplicado a una flota de taxis de Beijing, el modelo utiliza datos de trayectorias GPS y persigue maximizar las millas recorridas en modo eléctrico (*Vehicle Miles Traveled*, VMT), mostrando el interés de incorporar patrones reales de desplazamiento en la planificación de infraestructura destinada a flotas de alta utilización.

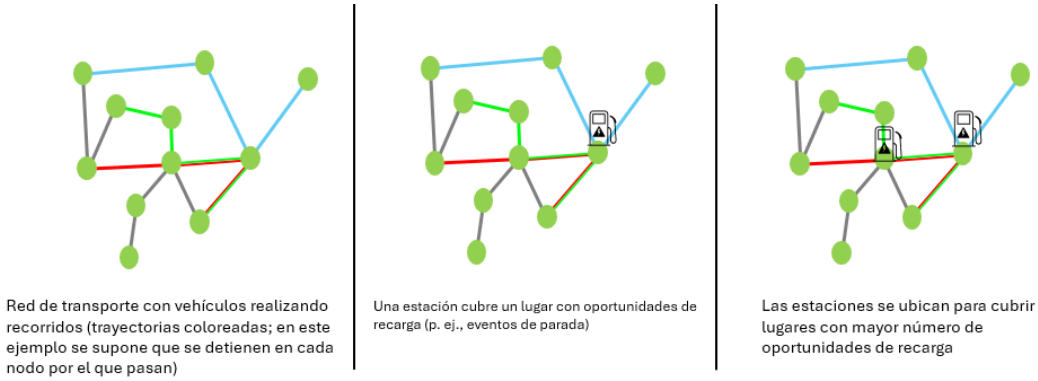


Figura 6 Principio simplificado de un enfoque basado en recorridos. Fuente: Metais et al. (2022). Elaboración propia.

2.8.4. Síntesis comparativa y requisitos de datos

Como se desprende de la revisión de Pagany, Ramirez Camargo, et al. (2019) y Motoaki (2019), no existe un modelo universal e idóneo, sino una especialización de los enfoques según el ámbito de aplicación. Los modelos basados en nodos resultan adecuados para problemas de cobertura urbana; los basados en rutas permiten representar la recarga asociada a corredores y flujos de movilidad; y los basados en actividades resultan especialmente útiles cuando los destinos y los tiempos de estancia condicionan la necesidad de recarga.

Una limitación común a muchos de estos modelos es su dependencia de datos de entrada suficientemente precisos y desagregados. La sofisticación del algoritmo no compensa una caracterización deficiente de la demanda, la cobertura existente, las condiciones territoriales o las restricciones técnicas. Por tanto, la utilidad de cada metodología depende tanto del procedimiento empleado como de la calidad y disponibilidad de la información utilizada.

Esta necesidad de caracterizar adecuadamente los datos de entrada ha impulsado una línea de investigación específica centrada no solo en dónde localizar la infraestructura, sino también en cómo anticipar su utilización futura. Por ello, el siguiente apartado analiza las metodologías existentes para la predicción y modelado de la demanda de recarga.

2.9 Predicción de demanda

La transición hacia la movilidad eléctrica requiere un despliegue progresivo de infraestructura capaz de responder a las necesidades de los usuarios. En este contexto, la estimación de la demanda de recarga constituye una variable fundamental para orientar su planificación. Como señalan Weekx et al. (2025), la precisión en esta etapa resulta especialmente relevante, ya que la demanda actúa como dato de entrada en los modelos de localización y condiciona los procesos posteriores de análisis y toma de decisiones.

2.9.1. Implicaciones de la incertidumbre en la estimación

Una estrategia de despliegue que ignore los patrones de comportamiento heterogéneos de los usuarios o que dependa de estimaciones excesivamente agregadas conlleva riesgos estructurales para el proyecto. La literatura identifica dos consecuencias opuestas derivadas del error de predicción**:**

- **Déficit de infraestructura y calidad del servicio:** Una predicción errónea a la baja puede resultar en una infraestructura insuficiente para atender la demanda prevista. Hardman et al. (2018) destacan la importancia de garantizar un acceso adecuado a la recarga en el hogar, el trabajo y los espacios públicos. En esta línea, Anderson et al. (2023), a partir del análisis de usuarios reales en Alemania, muestran que la recarga doméstica continúa siendo predominante y que la infraestructura pública se percibe como insuficiente, mientras que factores como la ocupación de los puntos y los tiempos de espera condicionan la decisión de carga**.**
- **Sobredimensionamiento e ineficiencia económica:** Por el contrario, una sobreestimación de la demanda puede derivar en inversiones innecesarias en infraestructura. Zhang et al. (2023) muestran que el problema de planificación presenta un efecto de rendimientos decrecientes, de modo que la incorporación sucesiva de nuevas estaciones produce ganancias marginales cada vez menores.

2.9.2. Desafíos metodológicos actuales

A pesar de su importancia crítica, una parte significativa de los modelos de predicción existentes presenta limitaciones que obstaculizan su uso directo en herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Weekx et al. (2025) identifican y clasifican estos desafíos en tres categorías principales:

- **Agregación espacial:** Muchos modelos se construyen a niveles geográficos excesivamente agregados, lo que restringe la precisión necesaria para fundamentar decisiones de localización específicas, por ejemplo, a escala de bloque de edificios.

- **Robustez longitudinal:** La capacidad de los modelos para mantener la validez de sus predicciones a lo largo del tiempo no siempre es evaluada, a pesar de tratarse de decisiones de localización de carácter estratégico y a largo plazo.
- **Datos observados limitados:** Los modelos basados exclusivamente en la demanda de carga observada pueden ignorar las limitaciones de capacidad de la infraestructura existente, así como la existencia de demanda latente no satisfecha, lo que introduce sesgos en la estimación de necesidades futuras.

Los modelos predictivos buscan, por tanto, estimar la utilización o la energía demandada con una resolución espacial y temporal suficiente para alimentar procesos posteriores de localización y dimensionamiento. En el presente trabajo, estas aproximaciones sirven como referencia, mientras que el Modelo Pi utiliza las variables disponibles para construir indicadores relativos de demanda y prioridad territorial, sin predecir directamente energía o sesiones futuras de recarga.

2.9.3. Variables y Fuentes de Datos para la Predicción

Investigaciones recientes han comenzado a utilizar datos reales para aislar qué factores urbanos atraen la demanda. Cooper et al. (2025) emplean modelos de Regresión Lineal Múltiple (MLR) y análisis espacial para estudiar la relación entre la infraestructura existente y diferentes indicadores territoriales y sociodemográficos. Sus resultados identifican como variables relevantes, entre otras, los centros de salud, las áreas de estacionamiento, los centros comerciales y los nodos de transporte, cuya influencia varía según la escala espacial utilizada.

Complementariamente, Signorile et al. (2025) analizan la integración con estaciones de servicio existentes como una alternativa para ciudades con escasez de suelo. Este enfoque permite aprovechar espacios ya transformados y valorar su potencial como localizaciones funcionales para infraestructura de recarga, sin que su presencia implique automáticamente la idoneidad del emplazamiento.

2.9.4. Clasificación de la demanda por comportamiento

La planificación de la infraestructura de recarga debe partir de la premisa de que la carga de un vehículo eléctrico no constituye un acto aislado de repostaje, sino un evento estrechamente vinculado al estacionamiento. Tal como describen Wagner et al. (2014), la demanda de recarga tiende a desplazarse hacia los lugares donde los usuarios desarrollan sus actividades cotidianas, integrándose de forma natural en los patrones diarios de movilidad y permanencia. Aunque la carga doméstica predomina en mercados maduros (Anderson et al., 2023), la infraestructura pública constituye un elemento esencial para garantizar la movilidad urbana y de larga distancia, pudiendo clasificarse, desde una perspectiva comportamental, en las siguientes tipologías:

- **Carga residencial compartida (*Shared-residential*):** Constituye un factor determinante para la adopción del vehículo eléctrico en entornos urbanos de alta densidad, donde una proporción significativa de la población carece de plaza de aparcamiento privada. Como evidencian He et al. (2022) en su estudio sobre Hong Kong y Charly et al. (2023), en estos contextos la infraestructura pública o compartida adquiere especial relevancia para los usuarios sin acceso a recarga vinculada. Esta tipología de demanda es predominantemente nocturna y de baja potencia, y su planificación requiere considerar la densidad residencial, la disponibilidad de aparcamiento privado y las características del tejido urbano. La identificación de una zona prioritaria debe completarse posteriormente mediante un análisis de detalle del emplazamiento.
- **Carga de destino (*Destination charging*):** Tiene lugar en espacios de estacionamiento prolongado asociados a Puntos de Interés (POIs), como centros comerciales, oficinas o equipamientos de ocio. Su viabilidad depende no solo de la presencia de dichos POIs, sino también de la disposición del usuario a desplazarse a pie desde el punto de recarga hasta su destino final. Pagany, Marquardt, et al. (2019) incorporan distancias máximas de caminata diferenciadas según el tipo de actividad y usuario, con valores comprendidos habitualmente entre 100 y 500 m, mientras que Wagner et al. (2014) muestran cómo la relevancia de los POIs disminuye progresivamente con la distancia al punto de recarga. Este patrón se caracteriza por tiempos de estacionamiento prolongados, lo que permite recurrir a recarga lenta o semirrápida y ajustar la potencia al tiempo de permanencia previsto.
- **Carga en ruta (*En-route charging*):** Resulta crítica para desplazamientos de larga distancia o para usuarios con alta movilidad diaria, al desempeñar un papel relevante frente a las limitaciones asociadas a la autonomía. En este contexto, Güler y Yomralıoğlu (2020) incorporan la proximidad a las carreteras principales y a las estaciones de servicio entre los criterios para localizar infraestructura de carga rápida. Por su parte, Gnann et al. (2018) muestran que las necesidades de este tipo de infraestructura dependen de factores como la autonomía de los vehículos y la potencia de recarga, que condicionan los tiempos de servicio y el número de puntos necesarios para atender la demanda.

2.9.5. El valor de los datos reales

La literatura reciente destaca el valor de contrastar los modelos de planificación con datos reales de utilización cuando estos se encuentran disponibles. Este tipo de información permite complementar las aproximaciones basadas únicamente en variables territoriales, sociodemográficas o hipótesis de comportamiento.

- **Datos reales de utilización.** Mortimer, Hecht, et al. (2022) analizan más de 21.000 puntos de recarga en Alemania y relacionan su utilización observada con distintas categorías de Puntos de Interés (POIs), generando mapas de atractivo territorial para apoyar la identificación de nuevas zonas de despliegue. Los propios autores advierten, no obstante, de limitaciones relacionadas con la calidad de los POIs, posibles correlaciones espurias y la ausencia de información detallada sobre las condiciones locales de la red eléctrica. De hecho, indican que la viabilidad de las zonas identificadas debe comprobarse posteriormente mediante un análisis específico de la red.
- **Predicción y demanda no observada.** Weekx et al. (2025) utilizan datos reales de recarga de Bruselas junto con variables de uso del suelo, características socioeconómicas y movilidad. Sus resultados muestran que el rendimiento predictivo depende de la métrica empleada para representar la demanda y que las predicciones basadas en las estaciones existentes no siempre coinciden con las solicitudes realizadas por los usuarios. Los autores señalan, por tanto, que la demanda observada constituye una aproximación incompleta de la demanda subyacente y recomiendan combinarla con criterios de cobertura espacial y otras fuentes de información.
- **Disponibilidad y apertura de los datos.** El caso noruego de NOBIL muestra la utilidad de disponer de una base de datos común y accesible sobre la infraestructura existente. La plataforma, propiedad de Enova y mantenida por la Norwegian EV Association, reúne información procedente de operadores, usuarios y otros proveedores sobre características técnicas, accesibilidad, conectores, capacidad de carga y localización de los puntos. Esta información se encuentra disponible para terceros mediante una API abierta, facilitando su reutilización por aplicaciones y servicios de movilidad.

En conjunto, estas experiencias muestran que los datos reales mejoran la información disponible para la planificación, pero no deben utilizarse de forma aislada. La utilización observada, la cobertura existente, los POIs y las condiciones territoriales y eléctricas aportan dimensiones complementarias que pueden integrarse dentro de un proceso de apoyo a la decisión.

2.10 Modelos de Localización y Dimensionamiento

El despliegue eficiente de la infraestructura de recarga constituye un problema de planificación complejo que va más allá de la simple determinación de emplazamientos. La literatura lo aborda mediante modelos de optimización y apoyo a la decisión orientados a equilibrar objetivos potencialmente conflictivos, como la minimización de los costes de inversión y operación, la maximización del nivel de servicio al usuario y el cumplimiento de las restricciones físicas impuestas por la red eléctrica y el territorio (Zhang et al., 2023).

Este proceso no se limita a decidir dónde ubicar las estaciones de recarga (localización), sino que implica definir simultáneamente su capacidad y tipología tecnológica (dimensionamiento). En este sentido, diversos trabajos muestran que la idoneidad de una ubicación depende del tipo de recarga que se pretenda ofrecer, ya que los patrones de uso asociados a la carga lenta vinculada al estacionamiento prolongado difieren sustancialmente de los requerimientos de la carga rápida asociada a desplazamientos en ruta (Wang & Lin, 2013).

2.10.1. Tipología de decisiones de optimización

Desde un punto de vista metodológico, la literatura clasifica la formulación del problema en función del alcance de las variables de decisión consideradas:

- **Problemas de localización pura (*Location problems*):** En estas formulaciones, el objetivo se restringe a identificar las ubicaciones óptimas para un número fijo de estaciones, asumiendo generalmente una capacidad homogénea o no limitante. Signorile et al. (2025) señalan las limitaciones de los modelos clásicos de cobertura binaria, que pueden no representar adecuadamente la disminución de la cobertura con la distancia ni la saturación de las estaciones. Para superar estas limitaciones, proponen incorporar una función de cobertura dependiente de la distancia y restricciones de capacidad.
- **Problemas de localización y dimensionamiento (*Location and sizing*):** Otras formulaciones integran simultáneamente la decisión sobre la ubicación y la capacidad de las estaciones. Zhang et al. (2023) muestran que este enfoque permite ajustar la inversión a la demanda esperada, reduciendo el riesgo de infrautilización de la infraestructura y mejorando la eficiencia económica del sistema. La consideración conjunta de potencia instalada y número de puntos de recarga resulta especialmente relevante en contextos urbanos con elevados costes de implantación.
- **Optimización bajo incertidumbre:** Otra línea de investigación incorpora la incertidumbre asociada a la demanda futura y al comportamiento del usuario mediante técnicas de lógica difusa. Bao et al. (2024) combinan la predicción espacio-temporal de la demanda con un modelo de optimización biobjetivo difuso para la localización y dimensionamiento de la infraestructura, buscando reducir el tiempo adicional de viaje y espera de los usuarios y maximizar el beneficio del operador.

2.10.2. Metodologías de resolución

La elevada complejidad computacional de los problemas de localización y dimensionamiento ha condicionado de forma decisiva las técnicas de resolución empleadas en la literatura científica.

La elección de la herramienta depende habitualmente de la escala del problema y de la naturaleza de la red analizada:

- **Modelos de optimización exacta (*MILP*):** Los modelos basados en Programación Lineal Entera Mixta permiten formular conjuntamente distintas variables y restricciones del problema. Zhang et al. (2023) señalan, no obstante, que su coste computacional y sus necesidades de memoria aumentan rápidamente a medida que crece la escala del problema, lo que limita su aplicación en redes de gran tamaño.
- **Metaheurísticas y algoritmos evolutivos:** Para abordar escenarios de mayor escala y estructura no convexa, numerosos estudios recurren a algoritmos avanzados. En este sentido, Mortimer, Hecht, et al. (2022) demuestran que los algoritmos genéticos constituyen una herramienta adecuada para la planificación de infraestructura de recarga cuando la función objetivo presenta múltiples óptimos locales y fuertes interacciones espaciales entre estaciones. Estos métodos permiten explorar de forma eficiente grandes espacios de solución continuos en los que los métodos exactos pueden presentar mayores dificultades computacionales.
- **Enfoques biobjetivo y soluciones de compromiso:** La toma de decisiones puede requerir equilibrar intereses contrapuestos. Bao et al. (2024) proponen un modelo de optimización biobjetivo difuso que integra simultáneamente la localización y el dimensionamiento de la infraestructura, buscando reducir el tiempo adicional de viaje y espera de los usuarios y maximizar el beneficio del operador.
- **Sistemas de Información Geográfica (*GIS*) como preprocesado:** De forma complementaria, algunos autores utilizan herramientas GIS para integrar diferentes criterios territoriales. Charly et al. (2023) combinan mediante QGIS variables como densidad de población, aparcamientos, proximidad a carreteras, residencias, equipamientos y puntos de recarga existentes para identificar y priorizar localizaciones según la función de recarga considerada.

2.11 Integración con la red eléctrica en contextos insulares

El despliegue de infraestructura de recarga no constituye únicamente un problema de movilidad y localización, sino que debe considerar también las condiciones de la red eléctrica. El incremento de la penetración del vehículo eléctrico introduce nuevas demandas que pueden concentrarse espacial y temporalmente, generando sobrecargas, problemas de tensión o necesidades adicionales de capacidad en determinados puntos de la red de distribución (Tayri & Ma, 2025).

2.11.1. Impacto sobre la red de distribución

Los impactos asociados a la recarga no se distribuyen de manera homogénea. Li y Jenn (2024), mediante un análisis de más de 5.000 alimentadores en California, muestran diferencias significativas según la localización y el tipo de demanda. Sus resultados estiman que el 50 % de los alimentadores requerirían ampliaciones de capacidad en 2035 y muestran una mayor necesidad de refuerzo en zonas dominadas por recarga residencial que en aquellas asociadas principalmente a recarga pública.

Estos resultados ponen de manifiesto la conveniencia de integrar la información eléctrica desde las primeras fases de planificación, evitando que la identificación de zonas se base exclusivamente en la concentración de demanda. La información sobre capacidad disponible puede utilizarse como indicador preliminar de oportunidad, aunque no constituye una garantía de conexión. La viabilidad eléctrica definitiva de cada actuación requiere posteriormente los correspondientes estudios de acceso y conexión.

2.11.2. Particularidades de los sistemas insulares

Esta relación entre movilidad y sistema eléctrico adquiere especial interés en territorios insulares con un fuerte componente turístico. Raveendran et al. (2020) estudian el caso de Menorca mediante la integración de información sobre movilidad, demanda eléctrica y distintos escenarios de penetración del vehículo eléctrico. El trabajo muestra una marcada variación estacional de los desplazamientos y de la demanda, con intensidades de tráfico considerablemente superiores durante el periodo turístico.

Aunque el objetivo principal de su investigación se centra en analizar el potencial de los vehículos eléctricos para prestar servicios al sistema eléctrico, el caso de Menorca constituye un antecedente relevante para el contexto balear al mostrar la importancia de considerar conjuntamente movilidad, estacionalidad y condiciones del sistema eléctrico. Esta particularidad refuerza la necesidad de incorporar la componente eléctrica como una dimensión adicional dentro de la planificación territorial de la infraestructura de recarga.

2.12 Evidencia empírica en mercados maduros: El caso de Noruega

Noruega constituye un caso de referencia para analizar la evolución de las necesidades de recarga en un mercado con elevada penetración del vehículo eléctrico. Más allá de las políticas e instrumentos de planificación descritos anteriormente, su experiencia permite observar cómo cambian las necesidades de infraestructura a medida que aumenta la adopción.

Lorentzen et al. (2017) muestran que el desarrollo de la infraestructura noruega combinó el apoyo público inicial con la expansión progresiva de una red de carga rápida en los principales

corredores viarios. Aunque la recarga doméstica constituye la opción predominante, la infraestructura pública mantiene una función relevante para los viajes de larga distancia y adquiere mayor importancia entre los usuarios con menor acceso a recarga vinculada.

Esta cuestión adquiere especial importancia en el entorno residencial. Figenbaum et al. (2022) señalan que la elevada disponibilidad de recarga doméstica en Noruega convive con dificultades específicas entre los residentes de edificios plurifamiliares sin acceso a una plaza privada. Para estos usuarios, las soluciones de recarga compartida y la infraestructura pública adquieren una mayor relevancia, mostrando que incluso en un mercado maduro la distribución de las necesidades de recarga depende de las características del tejido urbano y de la disponibilidad de aparcamiento privado.

En conjunto, la experiencia noruega muestra que el crecimiento del vehículo eléctrico no elimina la necesidad de planificación, sino que modifica sus prioridades. A medida que el mercado madura, adquieren mayor importancia la cobertura de usuarios sin recarga vinculada, la fiabilidad de la infraestructura pública y la diferenciación de las necesidades según el tipo de usuario. Estas enseñanzas resultan útiles como referencia para el presente trabajo, sin asumir una transferencia directa de las soluciones noruegas al contexto de Mallorca.

2.13 Síntesis metodológica y relevancia para el TFM

La revisión de la literatura permite concluir que la planificación de infraestructura de recarga constituye un problema multivariable en el que intervienen la demanda, los patrones de movilidad, las características territoriales y las condiciones de la red eléctrica. Los trabajos analizados muestran que la necesidad de recarga no depende únicamente de la distribución residencial, sino también del tipo de actividad realizada, los destinos de movilidad, los tiempos de estancia y los desplazamientos en ruta. En este sentido, los enfoques basados en nodos, rutas y actividades ofrecen perspectivas complementarias para representar las diferentes funciones que puede desempeñar la infraestructura.

La literatura también muestra que no existe una metodología única aplicable a todos los contextos. Motoaki (2019) identifica diferencias entre la sofisticación de determinados modelos académicos y los criterios utilizados en despliegues reales, mientras que otros trabajos incorporan progresivamente información de uso del suelo, movilidad, cobertura existente y condiciones de la red. Asimismo, estudios como Ji et al. (2025) ponen de manifiesto la importancia de considerar la variabilidad temporal de la demanda, aspecto especialmente relevante en territorios afectados por una elevada estacionalidad.

Esta cuestión adquiere especial interés en el contexto balear. Raveendran et al. (2020), mediante su aplicación a Menorca, muestran la relación existente entre movilidad, estacionalidad turística

y demanda eléctrica en un territorio insular. Por otra parte, Chen et al. (2020) evidencian la conveniencia de considerar las restricciones de la red eléctrica conjuntamente con las necesidades de movilidad durante la planificación de nuevas infraestructuras. Estos antecedentes muestran que la concentración de demanda por sí sola no resulta suficiente para establecer prioridades territoriales.

A partir de la revisión realizada, la necesidad metodológica que fundamenta este TFM no reside en la ausencia de modelos multicriterio o de metodologías de localización, ya ampliamente desarrollados en la literatura, sino en su adaptación e integración para un contexto insular como Mallorca, combinando de forma coherente información sobre demanda, cobertura existente, condiciones territoriales y oportunidad eléctrica, y diferenciando además la función que debe desempeñar la infraestructura.

Sobre esta base, el Modelo Pi se estructura en torno a tres elementos principales:

- **Caracterización diferenciada de la demanda**, considerando las particularidades de la recarga residencial compartida, la recarga de destino y oportunidad y la movilidad asociada a corredores interurbanos, junto con la influencia de la población flotante y la actividad turística.
- **Integración territorial y eléctrica**, incorporando la viabilidad del suelo, la cobertura proporcionada por la infraestructura existente y las condiciones preliminares de acceso a la red eléctrica como variables complementarias dentro del proceso de priorización.
- **Priorización según la misión de recarga**, generando tres salidas independientes que permiten identificar zonas con diferente prioridad relativa sin construir una única clasificación territorial ni determinar ubicaciones definitivas.

El presente TFM desarrolla, por tanto, una herramienta de apoyo a la planificación territorial basada en análisis espacial multicriterio. Su finalidad no es realizar el dimensionamiento electrotécnico de las instalaciones ni seleccionar emplazamientos exactos, sino establecer una metodología trazable y replicable que permita identificar zonas prioritarias para futuras actuaciones, sobre las que posteriormente deberán desarrollarse los estudios técnicos y administrativos correspondientes.

3. METODOLOGÍA

Este capítulo desarrolla la metodología empleada para abordar la planificación y localización de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos. A partir de las limitaciones identificadas en la revisión bibliográfica, se plantea la arquitectura del denominado "Modelo Pi", una herramienta de desarrollo propio basada en el Análisis Espacial Multicriterio (S-MCDA) mediante Sistemas de Información Geográfica (GIS).

En las siguientes secciones se describe el enfoque adoptado, las fuentes de información necesarias, el tratamiento de las variables y los criterios utilizados para su integración. La metodología establece una estructura común que permite evaluar el territorio mediante distintos componentes de demanda, junto con la cobertura de recarga existente, la viabilidad territorial y las condiciones preliminares de la red eléctrica. Su aplicación al caso de estudio permite obtener valores relativos de prioridad para la implantación de nueva infraestructura de recarga.

3.1 Introducción y relación con la necesidad identificada

La metodología se plantea como respuesta a la brecha identificada en la revisión del estado del arte. Aunque existen diferentes métodos para la localización de infraestructura de recarga, su aplicación puede resultar limitada cuando deben considerarse de forma conjunta distintos patrones de demanda, la población flotante, las condiciones de la red eléctrica y las restricciones territoriales.

Esta dificultad resulta especialmente relevante en territorios con una elevada componente estacional, donde los valores medios anuales no siempre representan adecuadamente las variaciones temporales ni la concentración espacial de los desplazamientos. Por este motivo, el Modelo Pi plantea una metodología multicriterio que permite integrar información de distinta naturaleza dentro de una misma unidad espacial de análisis.

El modelo busca identificar las zonas donde existe una mayor necesidad potencial de recarga y contrastarla con la cobertura de la infraestructura existente, las condiciones eléctricas preliminares y la viabilidad territorial. De esta forma, el resultado no determina una localización definitiva, sino que permite establecer una prioridad relativa entre las zonas analizadas y reducir el ámbito de búsqueda para etapas posteriores de planificación.

3.2 Enfoque metodológico general

Para responder a esta necesidad, el problema se aborda mediante un Análisis Espacial Multicriterio (S-MCDA) ejecutado en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (GIS), empleando específicamente el software QGIS. La principal ventaja de este enfoque es su

capacidad para homogeneizar, superponer y evaluar información de distinta naturaleza, como datos territoriales, turísticos, funcionales y técnicos, que de otro modo serían difíciles de comparar de forma conjunta.

El "Modelo Pi" adopta una lógica de integración multicriterio en dos etapas. En primer lugar, se aplica un filtro de viabilidad territorial que permite excluir aquellas zonas que no cumplen las condiciones establecidas para continuar en el análisis. Posteriormente, sobre las zonas viables, se realiza una evaluación gradual mediante una escala de prioridad, incorporando variables de demanda, cobertura existente, condicionantes preliminares de la red eléctrica y factores específicos de cada misión de recarga.

Este enfoque facilita una toma de decisiones basada en datos espaciales, permitiendo priorizar actuaciones allí donde coincide una mayor necesidad potencial de recarga con condiciones territoriales y técnicas más favorables para la implantación de infraestructura.

La escala de idoneidad obtenida expresa una prioridad relativa dentro del ámbito de estudio y no una autorización o viabilidad definitiva de implantación.

3.3 Estructura general de la metodología propuesta

El procedimiento del Modelo Pi se organiza como un proceso secuencial y modular que permite pasar desde la recopilación de información territorial hasta la identificación de zonas prioritarias y emplazamientos candidatos. La metodología se estructura en cuatro fases:

- **Fase 1. Preparación y homogeneización de los datos:** Las fuentes cartográficas y estadísticas se integran en un entorno GIS y se adaptan a un sistema de referencia común. En esta fase se depuran duplicidades, se corrigen geometrías, se relacionan tablas alfanuméricas con sus unidades territoriales y se preparan las variables necesarias para el análisis. Posteriormente, la información se transfiere a una unidad espacial común que permite comparar los resultados obtenidos en los distintos componentes del modelo.
- **Fase 2. Aplicación del filtro de viabilidad territorial:** La clasificación urbanística, las categorías de suelo rústico y las figuras de protección se integran en una máscara booleana. Los ámbitos preliminarmente compatibles reciben un valor de 1 y continúan en el análisis, mientras que las zonas restrictivas reciben un valor de 0 y quedan excluidas de la implantación ordinaria de nueva infraestructura. Este filtro se traslada a la unidad espacial de análisis y actúa como condición previa a la obtención de las prioridades finales.
- **Fase 3. Caracterización de la demanda por misión de recarga:** La demanda no se representa mediante un único indicador, sino mediante tres componentes

diferenciados: demanda residencial compartida, demanda de destino y oportunidad, y demanda asociada a corredores interurbanos y recarga de alta rotación. Cada componente se construye a partir de variables territoriales y funcionales adaptadas al comportamiento esperado del usuario.

- **Fase 4. Evaluación multicriterio y obtención de prioridades:** Las puntuaciones de demanda de cada submodelo se combinan con criterios comunes, como el déficit de cobertura de la infraestructura existente, la viabilidad territorial y las condiciones eléctricas preliminares, así como con variables específicas de cada misión de recarga. Como resultado se obtiene una prioridad relativa independiente para cada uno de los tres submodelos, que permite identificar las zonas que presentan una combinación más favorable de los criterios considerados. La priorización obtenida tiene carácter estratégico y no sustituye los estudios específicos de acceso, conexión, autorización urbanística o diseño constructivo.

3.4 Esquema funcional del Modelo Pi: inputs, cálculos y outputs

El Modelo Pi se estructura mediante una secuencia de entradas, operaciones de cálculo y resultados espaciales. Esta organización permite mantener la trazabilidad entre los datos originales, las transformaciones aplicadas y las puntuaciones obtenidas. Las entradas se agrupan según su función dentro del análisis: caracterización de la demanda por misión de recarga, cobertura de la infraestructura existente, viabilidad territorial y condiciones eléctricas preliminares, junto con variables funcionales específicas de cada submodelo. A partir de estas fuentes se realizan operaciones de depuración, integración espacial, normalización, aplicación del filtro territorial y construcción de indicadores de demanda y prioridad. Finalmente, , el modelo genera tres resultados espaciales de prioridad diferenciados, correspondientes a las misiones de recarga residencial compartida, destino y oportunidad, y corredores interurbanos y recarga de alta rotación.

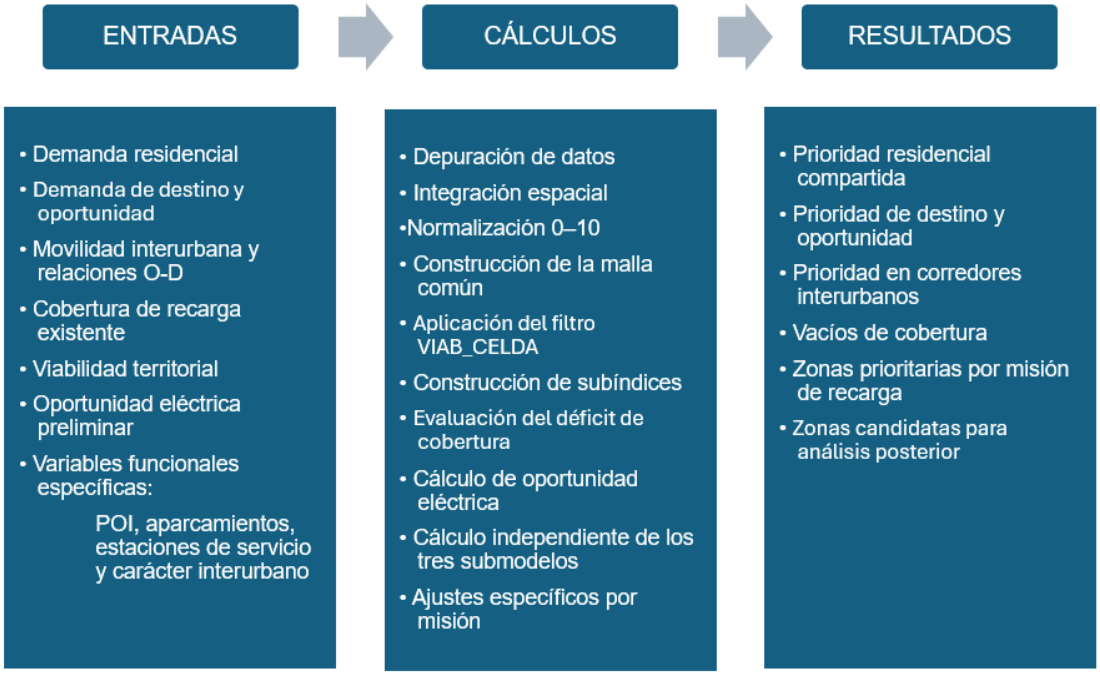


Figura 7 Esquema funcional del Modelo Pi: datos de entrada, procesos de cálculo y resultados. Fuente: elaboración propia.

3.5 Datos de entrada y fuentes de información

La aplicación del Modelo Pi depende de la disponibilidad, calidad y nivel de desagregación de la información espacial utilizada. Para facilitar su aplicación en otros territorios, las fuentes de entrada se organizan en variables comunes a los tres submodelos y variables específicas asociadas a cada misión de recarga. Se establece la necesidad de compilar el siguiente inventario de información:

- **Viabilidad territorial:** El modelo requiere cartografía urbanística, categorías de suelo rústico y figuras de protección territorial para identificar los ámbitos compatibles o restrictivos respecto a la implantación de nueva infraestructura. Esta información constituye la base para construir el filtro de viabilidad territorial descrito en el apartado anterior. Los usos o actividades existentes sobre suelo previamente transformado, como aparcamientos o estaciones de servicio, pueden incorporarse posteriormente como variables funcionales de determinados submodelos, pero su presencia no modifica por sí sola el resultado del filtro territorial.
- **Oportunidad eléctrica preliminar:** Para incorporar al modelo una aproximación a las condiciones de la red eléctrica, se requiere información georreferenciada sobre la capacidad disponible para nuevas instalaciones de demanda. Esta variable permite diferenciar zonas con una situación eléctrica preliminarmente más favorable y evitar que la priorización se base exclusivamente en la demanda o la cobertura existente. Para ello, pueden utilizarse bases de datos públicas de capacidad disponible publicadas por las

empresas distribuidoras u operadores de red, que informan de la potencia adicional disponible según el escenario considerado. En el Modelo Pi, esta información se utiliza como un criterio ponderado de oportunidad eléctrica, principalmente mediante la capacidad publicada y la proximidad a los nudos de red. Debido a su carácter informativo, los valores no se interpretan como simultáneos ni sumables y no sustituyen los estudios específicos de acceso, conexión y viabilidad técnica. La ausencia de capacidad publicada en un nudo tampoco se considera, por sí sola, un criterio automático de exclusión territorial.

- **Infraestructura de recarga existente:** Para caracterizar la cobertura actual e identificar zonas insuficientemente atendidas, el modelo requiere un inventario georreferenciado de los puntos de recarga existentes. Cuando existen varias fuentes, estas se integran y homogeneizan antes del análisis. Las capas se cruzan espacialmente para detectar coincidencias entre registros, aplicar un criterio de proximidad y generar una capa única depurada de duplicidades. A partir de esta información se calculan distancias a la infraestructura existente y se construyen indicadores de déficit de cobertura, de forma que las zonas más alejadas o insuficientemente atendidas puedan recibir una puntuación mayor dentro de los submodelos correspondientes.
- **Parque de turismos y población residente:** El modelo requiere, para cada municipio, información sobre el número de turismos registrados y la población de referencia. En el caso español, estos datos pueden obtenerse de los Datos Municipales Generales de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2026). Ambas variables permiten caracterizar la magnitud de la presión residencial municipal asociada a la población y al parque móvil. De forma complementaria, puede calcularse la tasa de motorización por cada 1.000 habitantes para comparar diferencias relativas entre municipios y detectar posibles valores atípicos. No obstante, esta tasa debe utilizarse con cautela cuando existan concentraciones administrativas de matriculaciones que no representen proporcionalmente la demanda residencial real. El municipio de matriculación se interpreta como una referencia territorial agregada y no como la localización exacta del uso del vehículo o de su recarga.
- **Tipología residencial y estructura urbana:** Para distribuir espacialmente la presión residencial dentro de cada municipio, el modelo requiere cartografía de los usos residenciales y de su tipología urbanística. Esta información permite diferenciar tejidos compactos, plurifamiliares y de núcleo antiguo frente a zonas extensivas o predominantemente unifamiliares. Los primeros pueden presentar una mayor necesidad potencial de infraestructura de recarga compartida debido a la menor

posibilidad de instalar puntos de recarga vinculados individualmente. La tipología residencial se utiliza como un indicador territorial indirecto y no como una medición exacta del número de viviendas, la densidad edificatoria o la disponibilidad real de garajes.

- **Déficit relativo de aparcamiento privado:** La posibilidad de disponer de una plaza de aparcamiento privada condiciona la capacidad de los residentes para instalar infraestructura de recarga vinculada. Para aproximar esta situación, el modelo incorpora información catastral sobre el número de inmuebles residenciales y la superficie destinada a aparcamiento en cada parcela. A partir de la relación entre ambas variables se construye un indicador de déficit relativo de aparcamiento privado, asignando una mayor puntuación de necesidad a las parcelas con menor superficie de aparcamiento por vivienda. Este indicador no representa un inventario exacto de plazas, ya que la información catastral puede incluir aparcamientos colectivos, rotacionales o vinculados a otros usos presentes en la parcela.
- **Capacidad alojativa turística:** Para representar la presión turística estructural, el modelo requiere información municipal sobre el número de establecimientos y plazas de alojamiento turístico. Se consideran tanto los establecimientos colectivos, como hoteles, apartamentos turísticos y otros alojamientos reglados, como las viviendas turísticas, cuando la información se encuentra disponible. El número total de plazas se utiliza como indicador de la capacidad potencial de acogida de visitantes y de la concentración territorial de estancias turísticas. Esta variable no representa la ocupación efectiva en una fecha determinada, sino la capacidad alojativa registrada, por lo que se complementa con indicadores de turismo receptor y población flotante que permitan aproximar la intensidad temporal de la demanda.
- **Atracción de demanda, turismo y población flotante:** La identificación de polos de atracción se realiza mediante la incorporación de puntos de interés asociados a actividades turísticas, comerciales, sanitarias y de transporte. Estas capas pueden obtenerse a través de QGIS con el complemento QuickOSM, bases de datos abiertas y registros institucionales. Entre las categorías consideradas pueden incluirse hoteles, hospitales, aeropuertos, restaurantes, aparcamientos, centros comerciales, supermercados y otros nodos de actividad. Para representar la estacionalidad y la presión asociada a visitantes, se incorporan además datos municipales de turismo receptor o población flotante. Los puntos de interés se utilizan como indicadores de atracción funcional. En el caso de los aparcamientos y otras instalaciones localizadas, su influencia se asocia al emplazamiento o unidad espacial en la que se encuentran,

evitando transferir automáticamente oportunidad a zonas próximas sin una relación funcional directa.

- **Flota de vehículos de alquiler y movilidad turística:** La flota *rent-a-car* constituye una fuente específica de demanda de recarga asociada a la movilidad turística, especialmente en territorios insulares. Ante la ausencia de datos públicos consolidados y territorialmente desagregados sobre su tamaño, composición tecnológica y distribución espacial, no se realiza una asignación municipal directa. Su presión potencial se representa indirectamente mediante variables relacionadas con el turismo receptor, la capacidad alojativa, el aeropuerto, las zonas hoteleras, los principales corredores viarios y los nodos de elevada rotación.
- **Red viaria y accesibilidad:** El modelo requiere cartografía de la red de carreteras para identificar los principales corredores de movilidad y servir de base para caracterizar la demanda asociada a los desplazamientos interurbanos y a la recarga en ruta. Esta información se complementa, cuando están disponibles, con relaciones origen-destino entre ámbitos territoriales, que permiten identificar los principales ejes de desplazamiento y establecer una intensidad relativa entre corredores. Los datos de intensidad de tráfico pueden utilizarse como información complementaria o de contraste cuando su resolución espacial permite asociarlos de forma fiable a tramos concretos de la red. Cuando esa correspondencia no puede establecerse con suficiente precisión, no se extrapolan de forma continua al conjunto de la carretera.
- **Ámbitos residenciales vacantes**: De forma complementaria, pueden incorporarse capas de suelo residencial vacante o de potencial desarrollo para anticipar futuras necesidades de infraestructura. Esta información debe interpretarse como una referencia urbanística temporal y no como una garantía de disponibilidad actual del suelo. También debe verificarse la fecha de elaboración de la cartografía, ya que algunos ámbitos inicialmente clasificados como vacantes pueden haber sido desarrollados posteriormente. Su utilización tiene carácter complementario y no constituye uno de los criterios comunes de prioridad de los tres submodelos.
- **Parque municipal susceptible de recarga eléctrica:** Además de conocer la magnitud general del parque de turismos, el modelo requiere una aproximación a la cantidad de vehículos que ya pueden generar demanda de recarga eléctrica en cada municipio. Esta información permite diferenciar territorios con valores similares de población o parque móvil, pero con distinto grado de implantación de tecnologías recargables, y aporta una referencia sobre la demanda eléctrica actualmente materializada. Cuando la fuente disponible no permite identificar directamente el número de turismos enchufables a

escala municipal, puede recurrirse a variables aproximadas de electrificación del parque. Estas estimaciones deben interpretarse como indicadores territoriales comparativos y no como un recuento exacto de vehículos que requieren recarga. (DGT, 2026)

Las variables anteriores no intervienen todas de la misma forma en el Modelo Pi. La viabilidad territorial, la cobertura de la infraestructura existente y la oportunidad eléctrica constituyen elementos comunes a los tres submodelos. El resto de variables se incorpora de forma selectiva en función de la misión de recarga analizada: residencial compartida, destino y oportunidad o corredores interurbanos y alta rotación.

3.6 Unidad espacial común y filtro de viabilidad territorial

Una vez definidas las fuentes de información utilizadas en el modelo, es necesario trasladar las distintas variables a una unidad espacial común de análisis. Para ello, el Modelo Pi utiliza una malla de celdas que permite integrar información originalmente disponible a escala municipal, puntual, lineal o poligonal y facilita la obtención de los resultados de los tres submodelos sobre una misma base espacial.

Cada celda dispone de un identificador único (ID_CELDA) que permite mantener la trazabilidad durante las distintas operaciones de unión y cálculo. Sobre esta unidad se incorporan posteriormente las variables de demanda, cobertura existente, oportunidad eléctrica y los factores específicos de cada misión de recarga. De esta forma, los resultados de los tres submodelos quedan referidos a una misma unidad espacial, manteniendo en cada caso su propia escala relativa de prioridad.

Antes de realizar la evaluación multicriterio se aplica el filtro de viabilidad territorial. Para ello, la información procedente de la clasificación urbanística, las categorías de suelo rústico y las figuras de protección se integra previamente en una máscara territorial. Su intersección con la malla permite determinar, para cada celda, la superficie que mantiene condiciones preliminares compatibles con la implantación de nueva infraestructura y su proporción respecto a la superficie total de la celda.

A partir de esta relación se define el campo booleano VIAB_CELDA. Las celdas que cumplen el criterio establecido reciben un valor de 1 y continúan en el proceso de priorización, mientras que aquellas que no lo cumplen reciben un valor de 0. La viabilidad territorial actúa, por tanto, como un filtro previo y no como una variable que pueda compensarse mediante una mayor demanda o mejores condiciones eléctricas. En los cálculos posteriores, una celda con VIAB_CELDA = 0 obtiene una prioridad final igual a cero.

Para facilitar el seguimiento del procedimiento, el Anexo A recoge el significado de los principales campos utilizados en QGIS, sus reglas de cálculo y su función dentro del Modelo Pi.

3.7 Caracterización de la demanda por misión de recarga

La demanda potencial de infraestructura de recarga no presenta el mismo patrón espacial ni las mismas necesidades de uso en todos los desplazamientos. Por este motivo, el Modelo Pi diferencia tres misiones de recarga: residencial compartida, destino y oportunidad, y corredores interurbanos y recarga de alta rotación.

Cada submodelo utiliza variables específicas para representar el comportamiento asociado a su misión de recarga, pero mantiene una estructura común de evaluación. En primer lugar, se obtiene un indicador de demanda sobre la unidad espacial de análisis. Posteriormente, esta demanda se combina con los criterios comunes de cobertura existente, oportunidad eléctrica preliminar y viabilidad territorial, junto con aquellos factores particulares que resultan relevantes para cada misión.

Los tres submodelos se calculan de forma independiente. Por tanto, sus resultados no representan alternativas excluyentes ni se integran en una única puntuación final, sino que permiten identificar qué zonas presentan mayor prioridad relativa para cada tipo de necesidad de recarga.

3.7.1. Normalización de las variables

Las variables cuantitativas utilizadas para caracterizar la demanda se transforman a una escala común de 0 a 10, de forma que puedan combinarse, aunque procedan de fuentes y unidades diferentes. Cuando presentan distribuciones muy asimétricas, como puede ocurrir con la población, el parque de turismos, la capacidad alojativa o el turismo receptor, se aplica previamente una transformación logarítmica mediante:

$$\log_{10}(x+1).$$

Posteriormente, los valores transformados se normalizan mediante sus valores mínimo y máximo dentro del ámbito de estudio:

$$S_i = 10 \cdot \frac{log_{10}(x_i+1) - min\,[log_{10}(x_i+1)]}{max\,[log_{10}(x_i+1)] - min\,[log_{10}(x_i+1)]}$$

Donde x_i representa el valor original de la variable en el municipio i, mientras que S_i corresponde a su puntuación normalizada en una escala de 0 a 10.

La transformación logarítmica reduce el efecto de los valores extremos y evita que las unidades territoriales de mayor tamaño condicionen de forma excesiva la distribución de las puntuaciones. Los valores originales se conservan en la base de datos para mantener la trazabilidad del proceso.

No todas las variables requieren esta transformación. Los indicadores que ya se encuentran definidos mediante puntuaciones, categorías o funciones específicas se incorporan directamente

en la escala de 0 a 10 correspondiente. En cada submodelo se indica qué variables intervienen y cómo se combinan.

3.7.2. Indicadores comunes de cobertura y oportunidad eléctrica

La cobertura proporcionada por la infraestructura existente se incorpora al Modelo Pi mediante indicadores construidos a partir de la distancia entre cada unidad espacial y el punto de recarga identificado más próximo. Estos indicadores se expresan en una escala de 0 a 10, donde los valores superiores representan una mayor carencia relativa de cobertura.

Para los submodelos de destino y oportunidad y de corredores interurbanos se utiliza el indicador de déficit de cobertura general (DEF_COB_GEN). Su cálculo parte de la distancia al punto de recarga más próximo (DIST_REC_M) y se define mediante una función lineal por tramos. Hasta una distancia de 250 m se considera que existe cobertura próxima y se asigna un déficit igual a cero. A partir de 1.000 m se alcanza el déficit máximo. Entre ambos valores, la puntuación aumenta linealmente:

$$DEF_COB_GEN = \begin{cases} 0, & d \leq 250 \\ 10, \frac{d-250}{750}, & 250 < d < 1000 \\ 10, & d \geq 1000 \end{cases}$$

donde representa la distancia, en metros, al punto de recarga existente más próximo.

Los límites de 250 y 1.000 m constituyen parámetros operativos del modelo y no distancias normativas de cobertura. Su finalidad es transformar la proximidad a la infraestructura existente en una puntuación gradual y comparable con el resto de los criterios utilizados en la evaluación multicriterio. Al tratarse de parámetros de modelización, pueden adaptarse a la escala territorial y a las características de la infraestructura analizada en futuras aplicaciones.

Para la misión residencial se utiliza el indicador específico DEF_COB_RES, construido mediante la misma función de distancia empleada en DEF_COB_GEN. Su aplicación se restringe a la malla utilizada por el submodelo residencial. No obstante, el déficit de cobertura no genera prioridad por sí mismo: su contribución únicamente resulta efectiva en la etapa final cuando la celda supera el filtro territorial y presenta una demanda residencial local ajustada positiva (DEM_RES_LOCAL_AJ > 0).

De esta forma, DEF_COB_GEN representa el déficit espacial de cobertura de carácter general, mientras que DEF_COB_RES adapta el mismo criterio a la misión residencial. En ambos casos, el objetivo es favorecer relativamente aquellas zonas donde la infraestructura existente presenta una menor cobertura, sin convertir esta condición en un criterio suficiente para generar prioridad.

De forma complementaria, las condiciones preliminares de la red eléctrica se incorporan mediante el indicador de oportunidad eléctrica (OP_ELEC). Para su construcción se utiliza la información de capacidad firme de demanda publicada y la distancia a los nudos de la red. La componente de capacidad se construye a partir de los valores positivos publicados, mientras que la ausencia de capacidad positiva en un nudo no constituye por sí sola un criterio de exclusión territorial.

La capacidad firme disponible se normaliza linealmente entre 0 y 10, obteniéndose el indicador S_CAP_ELEC:

$$S_CAP_ELEC = 10\frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}$$

donde C_i representa la capacidad firme disponible del nudo asociado a la unidad espacial, mientras que $C_{max}\ y\ C_{min}$ corresponden a los valores mínimo y máximo positivos considerados en el ámbito de estudio.

La proximidad al nudo se representa mediante DIST_ELEC_M. A partir de esta distancia se obtiene S_PROX_ELEC, asignando una puntuación máxima de 10 hasta 500 m y reduciéndola linealmente hasta alcanzar 0 a partir de 5.000 m:

$$S_PROX_ELEC = \begin{cases} 10, & d_e \leq 500 \\ 10, \frac{5000 - d_e}{4500}, & 500 < d < 5000 \\ 0, & d \geq 5000 \end{cases}$$

donde d_e representa la distancia, en metros, al nudo con capacidad firme positiva asociado.

Ambos componentes se integran con la misma ponderación:

$$OP_ELEC = 0{,}50 \cdot S_CAP_ELEC + 0{,}50 \cdot S_PROX_ELEC$$

OP_ELEC constituye un indicador comparativo de oportunidad eléctrica preliminar y no una garantía de conexión. La existencia de capacidad publicada igual a 0 MW en un nudo no determina por sí sola la exclusión de una unidad espacial, ya que la viabilidad efectiva debe comprobarse posteriormente mediante el procedimiento específico de acceso y conexión.

Los indicadores de cobertura y oportunidad eléctrica no generan por sí solos una zona prioritaria. Su función es actuar como factores de ajuste sobre una demanda previamente identificada dentro de cada submodelo.

3.7.3. Demanda residencial compartida

El submodelo de demanda residencial compartida tiene como objetivo identificar zonas donde exista una necesidad potencial de recarga asociada a la población residente y, al mismo tiempo, una menor facilidad para disponer de recarga vinculada en el domicilio. Para representar esta

situación se combinan variables de escala municipal con características propias del tejido residencial y con una aproximación a la disponibilidad de aparcamiento privado.

En una primera etapa se calcula la presión residencial municipal a partir de la población residente y del parque de turismos. Ambas variables se normalizan previamente en una escala de 0 a 10, obteniéndose respectivamente S_POB y S_PARQ_TUR, y se combinan mediante una ponderación equivalente:

$$DEM_RES_MUN = 0{,}50 \cdot S_POB + 0{,}50 \cdot S_PARQ_TUR$$

donde S_POB representa la población residente normalizada y S_PARQ_TUR el parque municipal de turismos normalizado.

De esta forma, la presión residencial municipal incorpora tanto la concentración de población como la magnitud del parque de turismos, evitando que el indicador dependa exclusivamente de una de estas variables.

Cuando la fuente disponible no permite identificar directamente el número de turismos enchufables a escala municipal, se utiliza una estimación territorial basada en los vehículos con distintivo CERO. El campo Est_Tur_0 se obtiene mediante:

$$Est_Tur_0 = DIST_CERO \frac{PARQ_TUR}{PARQ_TOTAL}$$

Est_Tur_0 se transforma posteriormente a una escala de 0 a 10 siguiendo el procedimiento de normalización definido en el apartado 3.7.1, obteniéndose *S_TUR_0*.

donde S_TUR_0 representa la puntuación normalizada de la estimación municipal de turismos con distintivo CERO.

A partir de esta variable se calcula la presión residencial municipal electrificada:

$$DEM_RES_EV = 0{,}70 \cdot DEM_RES_MUN + 0{,}30 \cdot S_TUR_0$$

La presión estructural municipal mantiene así un peso predominante, mientras que el grado de electrificación ya materializado actúa como componente complementario.

La presión municipal se distribuye posteriormente dentro del territorio mediante la tipología residencial. Los tejidos urbanos se agrupan en cinco categorías y reciben una puntuación *S_TIP_RES* en función de su predisposición relativa a depender de infraestructura de recarga compartida:

Tipología residencial	S_TIP_RES
Núcleo antiguo	10
Residencial plurifamiliar intensivo	9
Residencial plurifamiliar extensivo	8
Residencial unifamiliar intensivo	4
Residencial unifamiliar extensivo	2

Tabla 2 Puntuación asignada a las tipologías residenciales consideradas en el submodelo de recarga residencial compartida. Fuente: elaboración propia.

La puntuación superior de los núcleos antiguos y tejidos plurifamiliares responde a una menor facilidad esperada para disponer de aparcamiento privado vinculado a cada vivienda. Por el contrario, los tejidos unifamiliares reciben una puntuación inferior debido a su mayor predisposición potencial para disponer de estacionamiento dentro de la parcela. Estas puntuaciones constituyen parámetros del modelo y pueden revisarse en futuras aplicaciones.

De forma complementaria, se incorpora un indicador de déficit relativo de aparcamiento privado. Para cada parcela residencial se calcula inicialmente la relación entre la superficie catastral destinada a aparcamiento y el número de inmuebles residenciales, obteniéndose el campo ratio_sup_aparc_por_vivienda_m2:

$$ratio_sup_aparc_por_vivienda_m2 = \frac{sup_aparcamiento_m2}{n_inmuebles_vivienda}$$

Este valor expresa la superficie de aparcamiento registrada por vivienda y se utiliza posteriormente para asignar la puntuación NEC_AC.

Superficie de aparcamiento por vivienda	NEC_AC
> 50 m²/vivienda	1
> 30 y ≤ 50	3
> 15 y ≤ 30	5
> 5 y ≤ 15	7
> 0 y ≤ 5	9
Sin superficie registrada	10

Tabla 3 Clasificación del déficit relativo de aparcamiento privado y asignación de la puntuación NEC_AC. Fuente: elaboración propia.

Una puntuación elevada de NEC_AC representa una mayor limitación relativa para disponer de aparcamiento registrado y, por tanto, una mayor necesidad potencial de soluciones de recarga compartida. No obstante, el indicador debe interpretarse como una aproximación territorial y no como un inventario exacto de plazas privadas vinculadas a viviendas. La información catastral puede incluir superficies de aparcamiento colectivo, rotacional o asociado a otros usos presentes en la parcela, por lo que valores elevados de superficie de aparcamiento por vivienda no implican necesariamente una mayor disponibilidad de estacionamiento residencial privado.

Para trasladar la puntuación parcelaria a los polígonos residenciales, NEC_AC se pondera mediante el número de inmuebles residenciales identificado en cada parcela. Para ello se genera el campo auxiliar NEC_POND:

$$NEC_POND = NEC_AC \cdot n_inmuebles_vivienda$$

Posteriormente, dentro de cada polígono residencial se agregan el número de inmuebles residenciales y los valores ponderados. El indicador agregado de déficit relativo de aparcamiento residencial se calcula mediante:

$$NEC_AC_RES = \frac{\sum NEC_POND}{\sum n_inmuebles_vivienda}$$

De esta forma, las parcelas con un mayor número de inmuebles residenciales ejercen una influencia proporcionalmente superior sobre la puntuación del polígono. Los ámbitos en los que no se identifica información residencial suficiente se mantienen sin puntuación para este componente.

La primera estimación de demanda residencial compartida se obtiene combinando la presión residencial municipal electrificada (DEM_RES_EV), la puntuación asociada a la tipología residencial (S_TIP_RES) y el déficit relativo de aparcamiento agregado (NEC_AC_RES):

$$DEM_RES_AC = \frac{DEM_RES_EV + S_TIP_RES + NEC_AC_RES}{3}$$

Los tres componentes reciben inicialmente la misma ponderación. DEM_RES_AC constituye una puntuación relativa de necesidad residencial y no representa un número de vehículos, sesiones de recarga o energía demandada.

Durante la integración de estas variables se incorpora un ajuste adicional para evitar que un valor elevado de NEC_AC_RES incremente de forma excesiva la demanda en tejidos residenciales con una menor predisposición a depender de recarga compartida. Para ello, el déficit relativo de aparcamiento se modula mediante la propia puntuación de tipología residencial:

$$NEC_AC_AJ = NEC_AC_RES \frac{S_TIP_RES}{10}$$

El ajuste mantiene prácticamente toda la influencia del déficit de aparcamiento en núcleos antiguos y tejidos plurifamiliares, mientras que reduce progresivamente su efecto en los tejidos unifamiliares. A partir de este valor se recalcula la demanda residencial:

$$DEM_RES_AC_AJ = \frac{DEM_RES_EV + S_TIP_RES + NEC_AC_AJ}{3}$$

Una vez obtenida la demanda residencial ajustada sobre los polígonos residenciales, la información se traslada a la unidad espacial común del Modelo Pi mediante su intersección con la malla de análisis. Cada intersección genera un fragmento cuya superficie queda representada mediante AREA_FRAG.

Para los fragmentos residenciales considerados en el cálculo, AREA_RES_AJ recoge la superficie del fragmento (AREA_FRAG) que dispone de una demanda residencial ajustada válida. Esta superficie se utiliza para ponderar la demanda residencial ajustada según la parte de cada polígono que se encuentra efectivamente contenida en la celda.

$$POND_RES_AJ = DEM_RES_AC_AJ \cdot AREA_RES_AC_AJ$$

Los fragmentos pertenecientes a una misma celda se agregan posteriormente mediante ID_CELDA. A partir de las superficies y puntuaciones ponderadas se obtiene la demanda residencial media ajustada:

$$DEM_RES_MED_AJ = \frac{\sum POND_RES_AJ}{\sum AREA_RES_AC_AJ}$$

DEM_RES_MED_AJ representa, por tanto, la intensidad media de demanda residencial de los fragmentos presentes en cada celda, ponderada por la superficie que ocupa cada uno de ellos.

Esta operación evita que fragmentos residenciales de tamaño reducido tengan el mismo peso que aquellos que ocupan una superficie mayor dentro de la celda.

De forma complementaria, se calcula la proporción de superficie residencial considerada respecto a la superficie total de cada unidad espacial:

$$COB_RES_AJ = 100 \frac{\sum AREA_RES_AJ}{SUP_CELDA}$$

Finalmente, la demanda residencial local ajustada se obtiene combinando la intensidad media residencial con la proporción de superficie residencial realmente presente en la celda:

$$DEM_RES_LOCAL_AJ = DEM_RES_MED_AJ \frac{COB_RES_AJ}{100}$$

De este modo, una celda ocupada mayoritariamente por tejido residencial mantiene una mayor proporción de su demanda media, mientras que la puntuación disminuye cuando la superficie residencial representa únicamente una fracción reducida de la unidad espacial.

DEM_RES_LOCAL_AJ constituye la componente estructurante de demanda utilizada en la etapa final del submodelo residencial. Sobre esta variable se aplican el déficit específico de cobertura residencial (DEF_COB_RES) y la oportunidad eléctrica preliminar (OP_ELEC):

$$PRI_ZONA_RES_AJ = DEM_RES_LOCAL_AJ\left(0{,}50 + 0{,}30\,\frac{DEF_COB_RES}{10} + 0{,}20\frac{OP_ELEC}{10}\right)$$

El término constante de 0,50 permite conservar el peso principal de la demanda residencial local, mientras que el déficit de cobertura puede incrementar la puntuación hasta un 30 % adicional y la oportunidad eléctrica hasta un 20 %. De esta forma, ambos criterios modifican una necesidad residencial previamente identificada, pero no generan por sí solos una zona prioritaria en ausencia de demanda.

La expresión se aplica únicamente a las unidades espaciales que superan el filtro de viabilidad territorial y presentan demanda residencial local positiva. Cuando VIAB_CELDA = 0 o DEM_RES_LOCAL_AJ ≤ 0, la prioridad final es igual a cero.

El resultado del submodelo queda representado mediante PRI_ZONA_RES_AJ, una puntuación relativa que permite identificar las zonas donde una mayor necesidad potencial de recarga residencial compartida coincide con un mayor déficit de cobertura y con unas condiciones eléctricas preliminares más favorables para continuar el análisis.

3.7.4. Demanda de destino y oportunidad

El submodelo de demanda de destino y oportunidad representa aquellos desplazamientos en los que la recarga puede realizarse durante la permanencia del vehículo en el lugar de destino. Esta misión se asocia a actividades turísticas, comerciales, sanitarias, de ocio, transporte y otras funciones capaces de generar estancias compatibles con la recarga.

La caracterización comienza mediante variables que permiten estimar la presión asociada a visitantes y usuarios no necesariamente vinculados a su lugar de residencia. Cuando se dispone de información sobre capacidad alojativa y turismo receptor, ambas variables se normalizan y se combinan para obtener un indicador municipal de demanda turística y de destino:

$$DEM_DEST_MUN = \frac{S_TUR_CAP + S_TUR_REC}{2}$$

donde S_TUR_CAP representa la capacidad alojativa normalizada y S_TUR_REC la intensidad relativa del turismo receptor.

La componente espacial de esta demanda se caracteriza mediante información localizada sobre actividades capaces de atraer desplazamientos. Para ello pueden utilizarse puntos de interés correspondientes a alojamientos turísticos, centros sanitarios, comercio, restauración, nodos de transporte, grandes superficies y otras actividades con capacidad de generar estancia. Los pesos asociados a estos elementos se agregan en cada unidad espacial. Dado el carácter asimétrico de

la distribución resultante, la suma de pesos se transforma logarítmicamente y se normaliza en una escala de 0 a 10, obteniéndose el indicador S_POI_DEST.

$$S_POI_DEST = 10\frac{\ln(1 + PESO_DEST)}{\ln(1 + PESO_DEST_{max})}$$

La demanda local de destino se obtiene combinando esta intensidad funcional con la presión turística municipal:

$$DEM_DEST_LOCAL = S_POI_DEST \left(0{,}50 + 0{,}50\, 20\frac{DEM_DEST_MUN}{10}\right)$$

De esta forma, la presencia de actividades generadoras de desplazamientos constituye la base espacial de la demanda, mientras que la presión turística municipal actúa como factor de ajuste. El término constante de 0,50 permite conservar parte de la demanda asociada a destinos que no dependen exclusivamente del turismo, como centros sanitarios, comercio o equipamientos, mientras que una mayor presión turística incrementa progresivamente la puntuación local.

De forma complementaria, se construye el indicador de oportunidad funcional de destino (OP_DEST) a partir de la presencia de aparcamientos y estaciones de servicio, representados mediante los indicadores normalizados S_PARK_DEST y S_GAS_DEST. La presencia de aparcamientos se valoró de forma escalonada en función del número de elementos existentes en cada unidad espacial. Las celdas sin aparcamientos reciben S_PARK_DEST = 0, aquellas con un aparcamiento reciben una puntuación de 5, las que contienen dos reciben 7,5 y las que presentan tres o más alcanzan el valor máximo de 10. En el caso de las estaciones de servicio se utilizó un criterio de presencia, asignando S_GAS_DEST = 10 cuando existe al menos una instalación en la unidad espacial y S_GAS_DEST = 0 en caso contrario.

Dado que la misión de destino se encuentra principalmente asociada a lugares donde el vehículo permanece estacionado durante la realización de otra actividad, se asigna un mayor peso a la presencia de aparcamientos:

$$OP_DEST = 0{,}70 + S_PARK_DEST_ + 0{,}30\, S_GAS_DEST$$

De esta forma, los aparcamientos constituyen el principal indicador de oportunidad funcional, mientras que las estaciones de servicio actúan como elemento complementario. OP_DEST se mantiene separado de la demanda local y actúa únicamente como factor de ajuste en la etapa final de priorización.

La demanda de destino local actúa como componente estructurante del submodelo. Sobre este valor se aplica un factor de ajuste formado por el déficit de cobertura existente, la oportunidad eléctrica preliminar y la oportunidad funcional de destino. La prioridad se calcula mediante:

$$PRI_ZONA_DEST = DEM_DEST_LOCAL\left(0{,}45 + 0{,}20\frac{DEF_COB_GEN}{10} + 0{,}20\frac{OP_ELEC}{10} + 0{,}15\frac{OP_DEST}{10}\right)$$

El término constante 0,45 garantiza que la demanda local conserve un peso mínimo dentro de la priorización, mientras que el déficit de cobertura y la oportunidad eléctrica pueden incrementar la puntuación hasta un 20 % adicional cada uno y la oportunidad funcional de destino hasta un 15 %. De esta forma, los factores de oportunidad modifican la intensidad de una demanda previamente identificada, pero no generan prioridad por sí solos cuando no existe demanda local.

La expresión se aplica únicamente sobre las unidades espaciales que superan el filtro de viabilidad territorial y presentan DEM_DEST_LOCAL > 0. En caso contrario, la prioridad final es igual a cero.

El resultado del submodelo es una puntuación relativa de prioridad para la misión de destino y oportunidad, que permite identificar las zonas donde la intensidad relativa de demanda coincide con un mayor déficit de cobertura y con condiciones funcionales y eléctricas más favorables para continuar el análisis.

3.7.5. Corredores interurbanos y recarga de alta rotación

El submodelo de corredores interurbanos y recarga de alta rotación tiene como objetivo identificar zonas de interés para la recarga asociada a desplazamientos entre núcleos urbanos. En esta misión adquieren especial importancia la intensidad relativa de los movimientos entre territorios, la continuidad de los principales ejes viarios y la existencia de instalaciones vinculadas funcionalmente a la movilidad por carretera.

La demanda se caracteriza a partir de relaciones origen-destino entre unidades territoriales. Estas relaciones permiten identificar los principales corredores de movilidad y asignar a cada uno de ellos una intensidad relativa en función del volumen de desplazamientos asociado. La naturaleza de la fuente utilizada debe considerarse durante su interpretación, ya que los valores pueden representar viajes estimados, desplazamientos o movimientos detectados mediante dispositivos y no necesariamente un número directo de vehículos.

Para facilitar la comparación entre corredores, su intensidad se transforma a una escala de 0 a 10 tomando como referencia el corredor con mayor volumen de desplazamientos:

$$S_OD_CORR = 10 \cdot \frac{VIAJES_CORR}{\max(VIAJES_CORR)}$$

donde $VIAJES_CORR$ representa el volumen de desplazamientos asociado a cada corredor.

Los corredores se relacionan posteriormente con la unidad espacial común mediante un área de influencia adaptada a la escala del análisis. Cuando una misma unidad espacial queda asociada a más de un corredor, se conserva la mayor puntuación de intensidad en lugar de sumar los valores, evitando incrementar artificialmente la demanda en las zonas de solape. El indicador resultante constituye la demanda en ruta, representada mediante DEM_RUTA.

La demanda en ruta actúa como componente estructurante del submodelo. Sobre ella se aplica un factor de ajuste compuesto por el déficit de cobertura de la infraestructura existente, la oportunidad eléctrica preliminar y la presencia de estaciones de servicio vinculadas funcionalmente a la movilidad por carretera.

La presencia de estaciones de servicio se representa mediante el indicador S_GAS_RUTA. Para su construcción se contabilizan las instalaciones presentes en cada unidad espacial y se aplica un criterio binario de presencia:

$$S_{GAS_RUTA} = \begin{cases} 10, & Si\ n_{gas} > 0 \\ 0, & Si\ n_{gas} = 0 \end{cases}$$

donde n_{gas} representa el número de estaciones de servicio localizadas en la unidad espacial.

La prioridad inicial se obtiene mediante:

$$PRI_ZONA_RUTA = DEM_RUTA\left(0,45,+,0,20\frac{DEF_COB_GEN}{10} + 0{,}20\frac{OP_ELEC}{10} + 0{,}15\frac{S_GAS_RUTA}{10}\right)$$

El término constante 0,45 permite conservar una parte de la intensidad asociada al corredor, mientras que el déficit de cobertura y la oportunidad eléctrica pueden incrementar la puntuación hasta un 20 % adicional cada uno y la presencia funcional de estaciones de servicio hasta un 15 %. De este modo, estos factores modifican una demanda de ruta previamente identificada, pero no generan prioridad por sí solos en ausencia de DEM_RUTA.

La expresión se aplica únicamente a las unidades espaciales que superan el filtro de viabilidad territorial y presentan demanda de ruta. Cuando VIAB_CELDA = 0 o DEM_RUTA = 0, la prioridad es igual a cero.

De forma adicional, el submodelo incorpora un factor de carácter interurbano (S_INTERURB) destinado a diferenciar los tramos situados dentro de los núcleos urbanos de aquellos que cumplen una función más claramente asociada a los desplazamientos entre poblaciones. Este ajuste evita que la concentración de actividad, infraestructura y condiciones eléctricas habitualmente presente en las zonas urbanas desplace la prioridad del submodelo hacia ámbitos que pueden quedar mejor representados por las misiones residencial o de destino.

Para su construcción, se parte de la capa de núcleos urbanos y se genera un área de influencia de 500 m alrededor de los mismos. A partir de esta referencia territorial, el indicador S_INTERURB adopta valores discretos de acuerdo con la posición de cada unidad espacial:

- **0**, cuando la unidad espacial se sitúa dentro de un núcleo urbano;
- **5**, cuando se sitúa dentro del buffer de 500 m del núcleo urbano, pero fuera del núcleo;
- **10**, cuando se sitúa fuera de dicho buffer, representando un carácter claramente interurbano.

La prioridad ajustada se obtiene mediante:

$$PRI_RUTA_AJ = PRI_ZONA_RUTA \cdot \frac{S_INTERURB}{10}$$

De este modo, las unidades urbanas anulan la prioridad asociada a esta misión, las unidades de transición conservan el 50 % de la puntuación inicial y las unidades de carácter interurbano mantienen íntegramente dicha puntuación.

Los datos de intensidad de tráfico pueden emplearse como información complementaria para contrastar la relevancia de los corredores. Su incorporación directa al cálculo requiere, sin embargo, una correspondencia espacial suficientemente fiable entre los registros disponibles y los tramos de carretera. Cuando esta correspondencia no puede establecerse, se utilizan como elemento de contraste y no como una variable continua de demanda.

El resultado final es una puntuación relativa de prioridad para recarga en corredores interurbanos, representada mediante PRI_RUTA_AJ, que permite identificar zonas donde coinciden una mayor intensidad relativa de movilidad, un déficit de cobertura, condiciones preliminares favorables para la implantación de infraestructura y un carácter territorial compatible con la función interurbana del submodelo.

3.8 Ponderación y outputs de los submodelos

La evaluación multicriterio del Modelo Pi se realiza de forma independiente para cada una de las tres misiones de recarga. Aunque los submodelos utilizan variables específicas para representar sus respectivos patrones de demanda, mantienen una estructura común basada en la combinación de una demanda local con factores de cobertura, oportunidad eléctrica y variables funcionales específicas. La viabilidad territorial se aplica de forma independiente como filtro excluyente.

La demanda constituye el componente estructurante de la priorización. Los restantes criterios actúan como factores de ajuste que permiten aumentar o reducir la puntuación en función de las condiciones presentes en cada unidad espacial. De esta forma, una buena oportunidad

eléctrica o la presencia de una instalación funcionalmente favorable no generan por sí solas una zona prioritaria si previamente no existe una demanda asociada a la misión analizada.

La viabilidad territorial se mantiene fuera de la ponderación y actúa como filtro previo. Las unidades espaciales con VIAB_CELDA = 0 reciben una prioridad final igual a cero, independientemente de las puntuaciones obtenidas en el resto de variables. Este criterio evita que una elevada demanda o unas condiciones técnicas favorables compensen una restricción territorial previamente identificada.

Los criterios comunes se expresan mediante puntuaciones normalizadas entre 0 y 10. El déficit de cobertura incrementa la prioridad de aquellas zonas insuficientemente atendidas por la infraestructura existente, mientras que la oportunidad eléctrica permite introducir una valoración preliminar de las condiciones de la red. A estos factores se añaden variables específicas según la misión de recarga, como la oportunidad funcional de destino, la presencia de estaciones de servicio o el carácter interurbano del territorio.

Submodelo	Demanda de partida	Factores principales de ajuste	Output
Residencial compartida	Demanda residencial local	Déficit de cobertura residencial, oportunidad eléctrica	PRI_ZONA_RES_AJ
Destino y oportunidad	DEM_DEST_LOCAL	Déficit de cobertura general, oportunidad eléctrica, oportunidad funcional de destino	PRI_ZONA_DEST
Corredores interurbanos	DEM_RUTA	Déficit de cobertura general, oportunidad eléctrica, estaciones de servicio, carácter interurbano	PRI_RUTA_AJ

Tabla 4 Estructura de ponderación y outputs de los submodelos del Modelo Pi. Fuente: elaboración propia.

Las ponderaciones utilizadas se mantienen explícitas dentro de las expresiones de cálculo para facilitar su interpretación y trazabilidad. En los submodelos de destino y corredores, la demanda local conserva un término base de 0,45, mientras que el déficit de cobertura y la oportunidad eléctrica aportan hasta 0,20 cada uno y el factor funcional específico hasta 0,15. La suma máxima de estos factores es igual a 1, por lo que la puntuación final conserva la escala relativa de la demanda de partida.

En el submodelo de corredores se incorpora posteriormente el factor S_INTERURB, que permite ajustar la prioridad inicial en función del carácter urbano, de transición o interurbano de cada unidad espacial. Este ajuste responde a la necesidad de diferenciar la función de recarga en ruta respecto de las misiones residencial y de destino.

Cada submodelo genera una puntuación de prioridad relativa asociada a su respectiva misión de recarga. Estas puntuaciones se mantienen de forma independiente y no se integran en un índice único ni se utilizan para asignar automáticamente una misión predominante a cada unidad espacial. La comparación debe realizarse dentro de cada submodelo, atendiendo a la función de recarga que representa y a los criterios empleados en su construcción.

3.9 Validación, limitaciones y replicabilidad

La validación del Modelo Pi debe realizarse mediante el contraste entre las prioridades generadas y la información territorial disponible. Este contraste puede apoyarse en datos de movilidad, intensidad de tráfico, distribución de la infraestructura existente y principales polos de actividad. La revisión cartográfica en GIS permite además detectar posibles incoherencias derivadas de la resolución de los datos, de las operaciones espaciales o de los criterios utilizados.
La metodología presenta limitaciones relacionadas principalmente con la disponibilidad, actualización y nivel de desagregación de las fuentes. La capacidad eléctrica publicada constituye una referencia preliminar y no garantiza el acceso y conexión, mientras que determinados datos de movilidad pueden representar desplazamientos estimados y no vehículos individuales. Del mismo modo, algunas variables, como la disponibilidad de aparcamiento privado o determinadas flotas de alquiler, deben aproximarse mediante indicadores indirectos.
La resolución de la unidad espacial y los parámetros empleados para trasladar información puntual, lineal o poligonal también condicionan los resultados. Por este motivo, las distancias de influencia, los umbrales y las ponderaciones deben adaptarse a la escala y características del territorio analizado. Los pesos utilizados en el Modelo Pi no se consideran valores universales y, al no incorporarse un análisis formal de sensibilidad, deben revisarse en futuras aplicaciones del modelo.
La replicabilidad del procedimiento se basa en mantener su estructura general: homogeneización de los datos, construcción de una unidad espacial común, aplicación del filtro de viabilidad territorial, caracterización de las tres misiones de recarga y obtención de prioridades relativas. No es necesario disponer de las mismas fuentes, siempre que exista información equivalente que permita representar las variables consideradas.
Finalmente, las unidades espaciales con mayor puntuación deben entenderse como ámbitos de análisis preferente y no como emplazamientos directamente aptos para la instalación. La selección de una localización concreta requiere posteriormente comprobar la disponibilidad del suelo, las condiciones de acceso y conexión eléctrica, la normativa aplicable y los requisitos técnicos de la instalación.

4. Caso de Estudio

Este capítulo aterriza los planteamientos teóricos en la realidad de la isla de Mallorca. Con el fin de poner a prueba el Modelo Pi en un escenario real y complejo, el análisis sigue un recorrido lógico: comienza con el diagnóstico de la situación actual, continúa con el estudio detallado del territorio y finaliza con la aplicación progresiva del Modelo Pi para identificar zonas prioritarias y emplazamientos candidatos.

4.1 Marco institucional y diagnóstico de la red de recarga eléctrica

El despliegue de la infraestructura en Mallorca encuentra su fundamento operativo en el marco normativo autonómico analizado previamente. La Ley 10/2019 constituye uno de los principales instrumentos normativos que impulsan las políticas de movilidad eléctrica en el archipiélago. Mientras que en el bloque de revisión normativa se detallaron las obligaciones de renovación de flotas y reservas de suelo, en este capítulo se analiza cómo estas exigencias han dado forma al ecosistema actual de la isla.

Bajo este marco legal, la gobernanza de la red en Mallorca se ha estructurado mediante la participación de agentes públicos y privados. Por un lado, la administración pública impulsa la cohesión territorial y el desarrollo de infraestructura de acceso público a través del Institut Balear de l'Energia (IBE); por otro, los operadores privados amplían la oferta de recarga en función de criterios comerciales, de localización y de demanda. Dentro de este contexto, el sector de los vehículos de alquiler constituye un factor relevante de presión sobre la movilidad insular, aunque la ausencia de información pública completa y territorialmente desagregada impide cuantificar con precisión su contribución específica a la demanda de recarga.

4.1.1. El sistema MELIB y el cumplimiento del marco europeo (*AFIR*)

El sistema MELIB (Movilidad Eléctrica de las Illes Balears) constituye el eje central de la red pública de puntos de recarga en el archipiélago. Gestionado por el *Institut Balear de l'Energia* (IBE), su implantación respondió inicialmente a una lógica de impulso público mediante la gratuidad del servicio, evolucionando posteriormente hacia un modelo tarifario que busca asegurar la sostenibilidad económica y operativa de la infraestructura a largo plazo.

Más allá de la instalación física de los cargadores, MELIB actúa como una plataforma de gestión e interoperabilidad. Su función es centralizar la información disponible sobre la localización, las características y el estado de los puntos de recarga públicos. Esta integración facilita la consulta de la infraestructura por parte de los usuarios y aporta una fuente relevante para su seguimiento y planificación.

La mejora de la experiencia del usuario es uno de los pilares del sistema, materializado en la aplicación móvil MELIB 2025. Esta herramienta permite la activación y el seguimiento de las sesiones de carga, ofreciendo además un servicio de atención permanente para la resolución de incidencias. De forma complementaria, el IBE garantiza la fiabilidad de la red mediante un programa de mantenimiento preventivo y correctivo orientado a maximizar la disponibilidad técnica de los equipos (Institut Balear de l'Energia, s. f.).

En este sentido, el sistema se alinea con las exigencias de transparencia e información establecidas por el Reglamento de Infraestructura para Combustibles Alternativos (AFIR). La consulta de la ubicación, potencia y disponibilidad comunicada de los puntos reduce la incertidumbre del conductor y facilita la planificación de los desplazamientos.

A continuación, se presenta la distribución geográfica de los puntos de recarga integrados en la red MELIB en Mallorca (Figura 8).

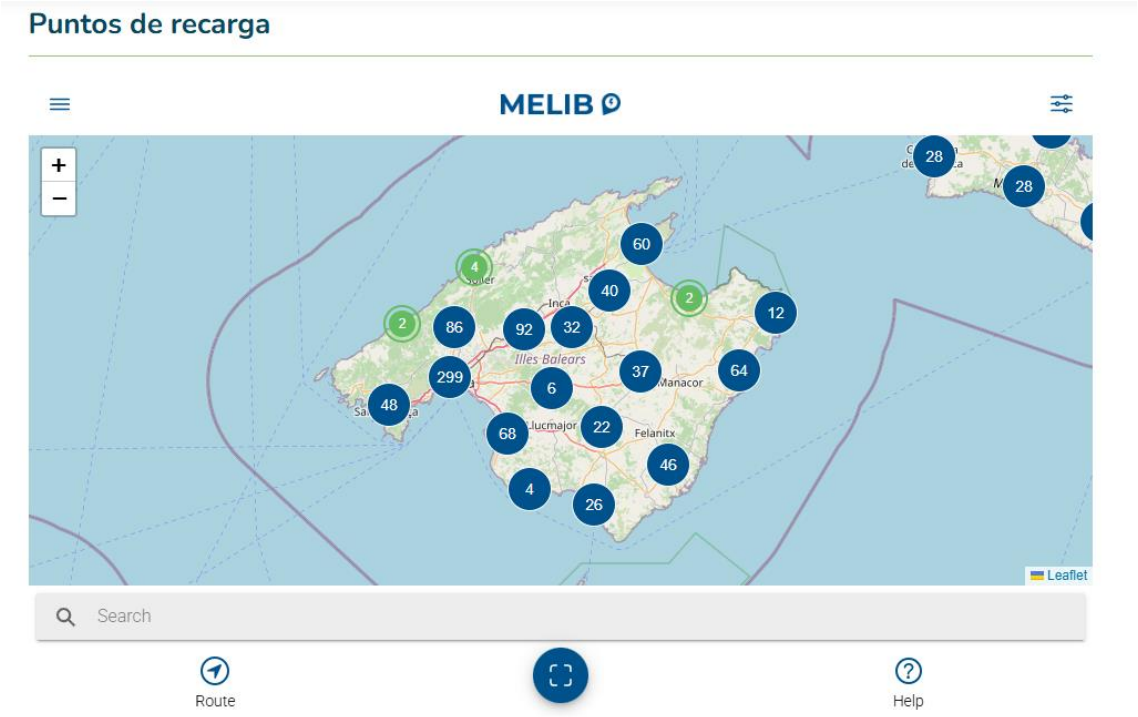


Figura 8 Distribución geográfica de los puntos de recarga integrados en la red MELIB en Mallorca. Fuente: Institut Balear de l'Energia (IBE).

4.1.2. Coexistencia con el sector privado y operadores de red

La red pública MELIB no constituye la totalidad de la oferta de recarga disponible en Mallorca. Junto a ella existe una red de puntos gestionados por operadores privados y otras entidades, por lo que el diagnóstico de la infraestructura insular requiere considerar ambas realidades. Para identificar estos operadores se utilizó la capa de puntos de recarga del Geoportal del MITECO, cuyo campo CPO permite reconocer la entidad responsable de cada instalación (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2026).

La revisión de estos registros muestra una oferta bastante diversa. Entre los operadores presentes aparecen grandes compañías energéticas, empresas especializadas en recarga, entidades públicas y operadores vinculados a establecimientos o servicios concretos. Con el objetivo de facilitar la interpretación de esta diversidad, en este trabajo se realiza una agrupación descriptiva de los CPO identificados en cuatro perfiles:

- **Operadores energéticos y vinculados al sector de los combustibles.** En este grupo se incluyen compañías como Endesa X Way, Iberdrola, Fenie Energía o Repsol, que cuentan con puntos de recarga distribuidos en diferentes emplazamientos de la isla.
- **Operadores especializados en movilidad eléctrica.** La base de datos identifica también empresas centradas específicamente en la prestación o gestión de servicios de recarga, entre ellas Wenea, Charging Together (operador asociado a Zunder)criterio, Etecnic o Tesla Spain.
- **Entidades públicas y operadores locales.** En determinados emplazamientos aparecen entidades vinculadas a la gestión pública o municipal, como EMAYA, junto con otros operadores de ámbito local.
- **Recarga asociada a destinos y actividades concretas.** Una parte de los puntos se encuentra vinculada a establecimientos comerciales, turísticos, de servicios o equipamientos donde la recarga constituye una prestación complementaria a la actividad principal.

Esta clasificación no corresponde a una tipología oficial del Geoportal, sino a una agrupación realizada en el marco del presente trabajo a partir de los CPO identificados en la base de datos, con el objetivo de caracterizar de forma sencilla la diversidad de actores presentes en Mallorca. La coexistencia de diferentes redes introduce, además, la cuestión de la interoperabilidad. Figenbaum et al. (2022) señalan que las diferencias entre operadores y sistemas de acceso pueden generar barreras para el usuario y destacan la importancia de facilitar la itinerancia (*roaming*) entre redes. En el caso de Mallorca, por tanto, la utilidad de la infraestructura no depende únicamente del número o de la distribución territorial de los puntos, sino también de la facilidad con la que el usuario puede acceder a instalaciones gestionadas por distintos operadores.



Figura 9 Distribución de puntos de recarga de la red privada de Endesa X Way en Mallorca. Fuente: Endesa X Way (s. f.).

4.2 Fuentes de información utilizadas en la aplicación a Mallorca

La aplicación del Modelo Pi al caso de Mallorca requiere concretar las fuentes de información definidas de forma general en el capítulo de Metodología. Para ello, se recopilaron fuentes cartográficas, estadísticas, de movilidad, de infraestructura de recarga y de red eléctrica procedentes de organismos públicos y plataformas de información geográfica. La Tabla X resume las principales fuentes empleadas y su función dentro del caso de estudio. El tratamiento específico de cada variable se desarrolla posteriormente en los apartados correspondientes.

Información utilizada	Fuente aplicada en Mallorca	Función en el estudio
Clasificación urbanística, suelo rústico y cartografía territorial	**ideIB**	Filtro de viabilidad territorial y tipología residencial
Información parcelaria, viviendas y superficie de aparcamiento	**Dirección General del Catastro – archivos CAT**	Déficit relativo de aparcamiento privado
Evolución del parque enchufable 2020–2024	**DGT – Panel de datos del parque de vehículos**	Diagnóstico histórico
Parque municipal, población y distintivo CERO	**DGT – Datos municipales, información general 2025**	Presión residencial municipal electrificada
Capacidad alojativa municipal	**AETIB – Estadísticas de alojamientos turísticos**	Demanda turística municipal

Información utilizada	Fuente aplicada en Mallorca	Función en el estudio
Turismo receptor municipal	**INE – Medición del turismo receptor a partir de la posición de los teléfonos móviles**	Presión turística y estacionalidad
Puntos de interés	**OpenStreetMap mediante QuickOSM**	Atracción y oportunidad funcional de destino
Flujos origen-destino residentes y turistas	**Consell de Mallorca – Estudi de Càrrega 2024**	Construcción de corredores interurbanos
Intensidad media diaria	**Consell de Mallorca – IMD 2025**	Contraste de los corredores seleccionados
Infraestructura de recarga existente	**MITECO, MELIB/IBE y Electromaps**	Cobertura existente y cálculo de déficits
Capacidad firme de demanda	**e-distribución**	Oportunidad eléctrica preliminar
Intensidad media diaria de tráfico (IMD)	**Consell de Mallorca – IMD 2025**	Contraste de los corredores seleccionados

Tabla 5 Principales fuentes de información utilizadas en la aplicación del Modelo Pi al caso de Mallorca. Fuente: elaboración propia.

4.3 Estructura territorial y clasificación del suelo

El despliegue de infraestructura de recarga en Mallorca no puede entenderse como un proceso de libre ocupación del territorio, sino como una actuación condicionada por la ordenación urbanística, territorial y ambiental. En el Modelo Pi, esta dimensión constituye el primer filtro espacial del análisis, ya que antes de valorar la demanda, la cobertura existente o la oportunidad eléctrica resulta necesario identificar los ámbitos en los que una nueva implantación ordinaria puede considerarse preliminarmente compatible desde el punto de vista territorial.

4.3.1. Análisis de usos del suelo mediante el visor ideIB

La cartografía de calificación del suelo disponible en el visor ideIB (Institut Cartogràfic i Geogràfic de les Illes Balears [ICGIB], s. f.) permite diferenciar tejidos urbanos y usos territoriales con distinta relevancia para la implantación de infraestructura de recarga. En términos generales, los tejidos residenciales compactos y plurifamiliares presentan un mayor interés potencial para la recarga pública compartida, al concentrar población y mostrar, previsiblemente, una menor disponibilidad de aparcamiento privado vinculado a la vivienda. Por el contrario, los ámbitos unifamiliares extensivos tienden a mostrar una mayor presencia de aparcamiento privado, lo que reduce su dependencia relativa de la red pública.

De forma complementaria, los usos turísticos y comerciales identifican áreas con elevada concentración de actividades, estancia temporal y rotación de vehículos, mientras que los usos industriales y logísticos señalan espacios funcionalmente vinculados a la movilidad laboral, comercial o de flotas. Esta lectura no determina por sí sola la localización de nuevos puntos de recarga, pero aporta una base territorial útil para interpretar la distribución potencial de distintas misiones de recarga.

A continuación, se muestra la capa de calificación del suelo utilizada como base territorial del análisis.

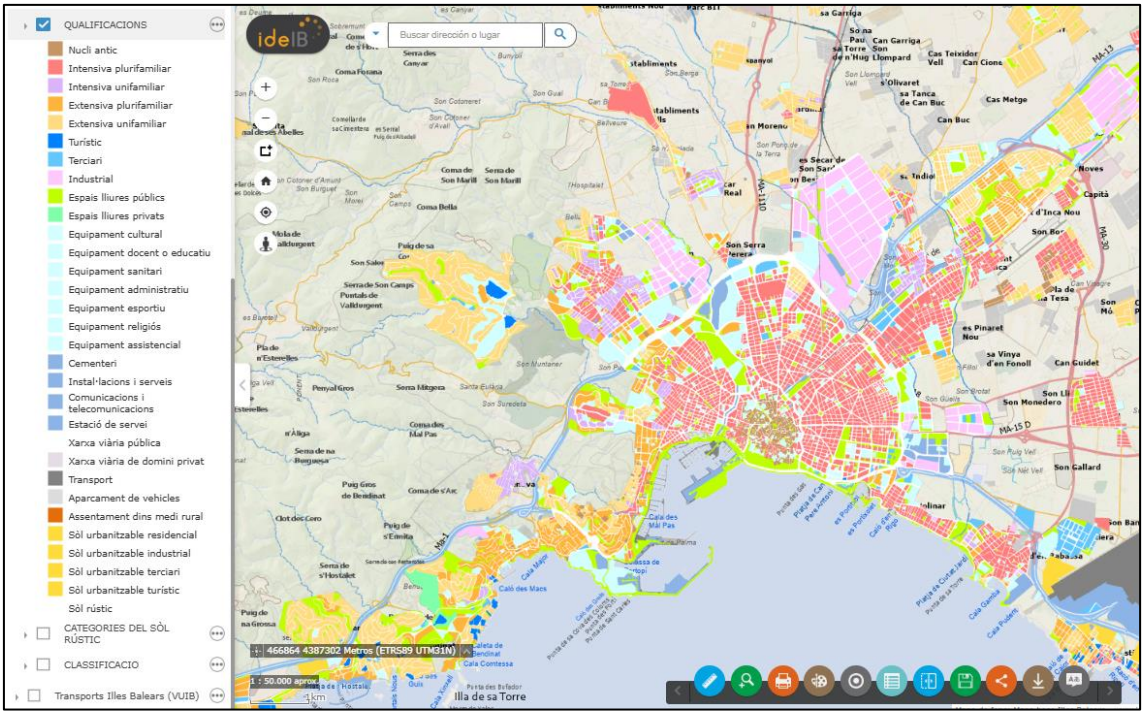


Figura 10 Clasificación de usos del suelo en Mallorca mediante el visor ideIB. Fuente: ideIB (https://ideib.caib.es/visor).

4.3.2. Suelo Rústico: El Filtro de Restricción Territorial

Además de la calificación urbanística, el modelo incorpora la cartografía de categorías del suelo rústico, ya que estas determinan distintos grados de compatibilidad o restricción para nuevas implantaciones. Las categorías sometidas a protección ambiental, paisajística, agraria o territorial se consideran durante la construcción del filtro de viabilidad, diferenciándolas de los ámbitos urbanos o transformados que presentan una mayor compatibilidad preliminar con nuevas actuaciones.

A partir de la clasificación disponible en ideIB (ICGIB, s. f.), las distintas categorías de suelo rústico se agrupan según su función dentro del análisis territorial:

- Suelo Rústico de Régimen General (SRRG): se incorpora al análisis atendiendo a su clasificación territorial y a las condiciones establecidas para la construcción de la máscara de viabilidad.
- Áreas de Interés Agrario (AIA), suelo forestal y otras categorías con protección específica: se consideran ámbitos con mayores restricciones para nuevas implantaciones.
- Áreas sometidas a protección paisajística o territorial, entre ellas ARIP, AEI y APT: se incorporan como ámbitos restrictivos dentro de la máscara territorial.

Esta clasificación se utiliza como criterio espacial de preselección y no sustituye la comprobación individual de la normativa aplicable a una parcela o actuación concreta.

A continuación, se muestra la capa de suelo rústico del ideIB:



Figura 11 Categorías del suelo rústico en Mallorca mediante el visor ideIB. Fuente: ideIB (https://ideib.caib.es/visor).

4.3.3. Construcción de la máscara de viabilidad territorial en QGIS

Las capas territoriales seleccionadas se integraron y reclasificaron en QGIS para generar una capa unificada denominada Máscara Maestra de viabilidad territorial. La capa resultante incorpora el campo VIABILIDAD, al que se asigna el valor 1 en los ámbitos que continúan dentro del análisis ordinario y el valor 0 en aquellos que presentan restricciones relevantes para nuevas implantaciones.

Esta clasificación constituye una simplificación operativa destinada a reducir el ámbito inicial de búsqueda y no equivale a una declaración jurídica definitiva sobre la posibilidad de ejecutar una instalación. Los ámbitos clasificados con valor 0 se excluyen del proceso posterior de priorización, sin que una mayor demanda, una mejor oportunidad eléctrica o la presencia de instalaciones existentes puedan compensar esta condición territorial.

Por tanto, elementos como estaciones de servicio, aparcamientos u otras actividades implantadas pueden incorporarse posteriormente como variables funcionales de los submodelos correspondientes, pero no modifican por sí solos la clasificación territorial asignada al ámbito en el que se encuentran.

A continuación, se muestra la representación de la máscara maestra generada en QGIS a partir de la integración y reclasificación de las capas de calificación del suelo y categorías del suelo rústico. Esta capa constituye el filtro territorial previo del Modelo Pi y distingue entre ámbitos que continúan en el análisis y ámbitos que quedan excluidos para nuevas implantaciones ordinarias.

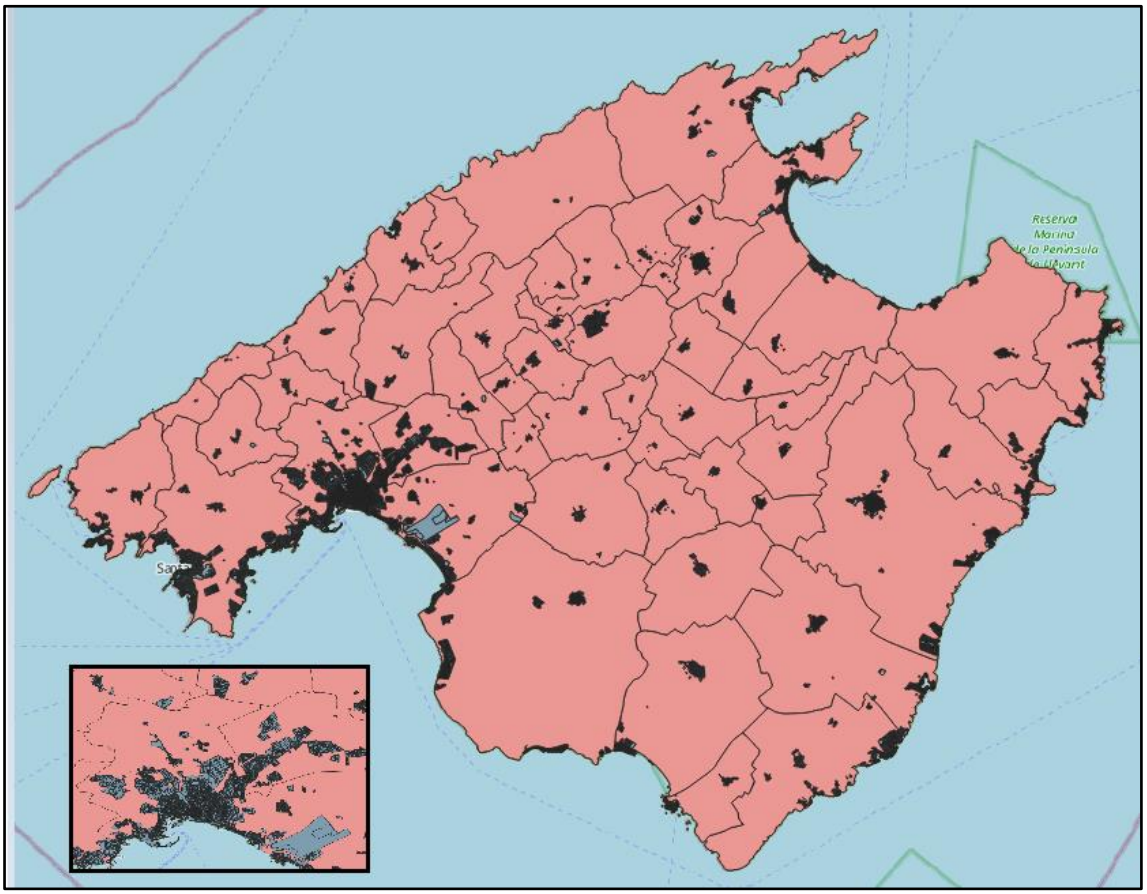


Figura 12 Máscara maestra de viabilidad territorial del Modelo Pi, generada a partir de la cartografía de ideIB. Fuente: ideIB. Elaboración propia en QGIS.

4.3.4. Traslado de la viabilidad territorial a la malla común

Para trasladar el filtro territorial a una unidad espacial común se generó en QGIS una malla regular de 500 × 500 m sobre el ámbito de Mallorca. La capa resultante está formada por 15.230 celdas, cada una identificada mediante el campo ID_CELDA, y constituye la base espacial común utilizada posteriormente en los tres submodelos del Modelo Pi.

La Máscara Maestra se interceptó con la malla para determinar, en cada celda, la superficie clasificada como viable (SUP_VIABLE) y la superficie total de la unidad (SUP_CELDA). De forma complementaria, se calculó la proporción de superficie viable mediante:

$$PCT_VIABLE = \frac{SUP_VIABLE}{SUP_CELDA} \cdot 100$$

A partir de esta información se definió el campo booleano VIAB_CELDA, empleado como filtro territorial común en los tres submodelos. Se asignó el valor 1 a las celdas que presentan alguna superficie clasificada como viable (PCT_VIABLE > 0) y el valor 0 a aquellas sin superficie viable (PCT_VIABLE = 0). Por tanto, VIAB_CELDA = 1 indica que la celda contiene superficie apta para continuar en el análisis, aunque esta no ocupe necesariamente la totalidad de la unidad espacial. La aplicación del procedimiento dio como resultado 2.205 celdas con VIAB_CELDA = 1 y 13.025 celdas con VIAB_CELDA = 0, sobre un total de 15.230 unidades espaciales.

VIAB_CELDA no interviene como una variable ponderada dentro del análisis multicriterio. Su función es determinar qué unidades espaciales continúan en el proceso de priorización. Las celdas clasificadas con valor 0 reciben una prioridad final igual a cero, independientemente de las puntuaciones alcanzadas por las variables de demanda, cobertura u oportunidad eléctrica.

Esta operación permite trasladar la información territorial originalmente disponible en formato poligonal a la misma unidad espacial utilizada posteriormente para evaluar la demanda residencial compartida, la demanda de destino y oportunidad y la demanda asociada a corredores interurbanos.

4.4 Mallorca como sistema eléctrico y territorial singular

La planificación de la infraestructura de recarga en Mallorca debe contextualizarse dentro de las particularidades del sistema eléctrico y territorial balear. A diferencia del sistema peninsular, las Islas Baleares operan como sistema eléctrico no peninsular, caracterizado por una menor interconexión con el resto del sistema eléctrico español y por una mayor dependencia de la generación local para garantizar la seguridad del suministro (Red Eléctrica de España, 2025a).

4.4.1. Balance energético y dependencia del sistema

Según los datos publicados por Red Eléctrica de España para el cierre de 2024, la demanda eléctrica anual de las Illes Balears alcanzó los 6.063 GWh, mientras que la potencia instalada de generación se situó en 2.238 MW. La estructura de generación continúa presentando un peso relevante de las tecnologías térmicas convencionales, aunque durante los últimos años se ha

producido un crecimiento progresivo de la generación renovable, especialmente de la solar fotovoltaica.

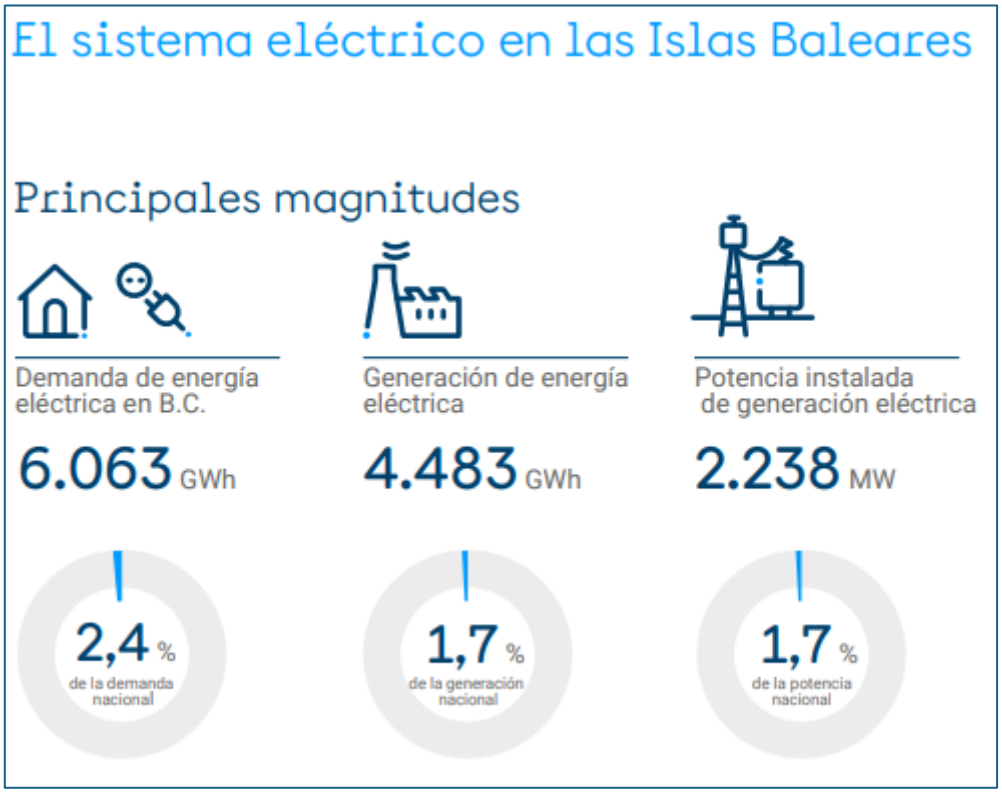


Figura 13 Magnitudes principales del sistema eléctrico balear. Fuente: Red Eléctrica de España (2025a), datos de 2024.

El sistema cuenta, además, con una interconexión submarina en corriente continua con la Península, correspondiente al enlace Rómulo. Durante 2024, la energía importada a través de esta infraestructura permitió cubrir el 26,1 % de la demanda eléctrica del archipiélago. Esta conexión contribuye a reforzar la seguridad del suministro y reduce parcialmente la dependencia de la generación local.

El balance eléctrico de 2024 presenta también una evolución favorable de los indicadores asociados a la incorporación de energías renovables y a la calidad del suministro, cuyos principales resultados se resumen en la tabla siguiente.

Indicador	Valor / Porcentaje	Observación técnica
Generación Renovable Local	655 GWh	Incremento del 24,3% respecto a 2023
Cuota Renovable Propia	14,60%	Máximo histórico anual registrado
Cobertura Renovable Total	25,90%	Incluye la energía limpia importada por cable
Disponibilidad de la Red	98,60%	Ratio superior al registrado en 2023

Tabla 6 Indicadores de sostenibilidad y calidad del sistema eléctrico (2024). Fuente: Nota de Prensa de Red Eléctrica de España (2025b). Elaboración propia

Estos valores permiten caracterizar el contexto energético general en el que se integra el crecimiento de la movilidad eléctrica. No obstante, indicadores como la disponibilidad global de la red o la potencia total instalada no deben interpretarse como una medida directa de la capacidad disponible para conectar nuevas instalaciones de recarga en un emplazamiento concreto. Esta posibilidad depende de las características de la red de distribución, del nivel de tensión, de la potencia solicitada y del resultado del procedimiento específico de acceso y conexión.

La distribución territorial de la capacidad de generación y el peso de la interconexión con la Península permiten contextualizar el funcionamiento general del sistema balear, pero no sustituyen el análisis de la red de distribución necesario para evaluar nuevas demandas eléctricas.

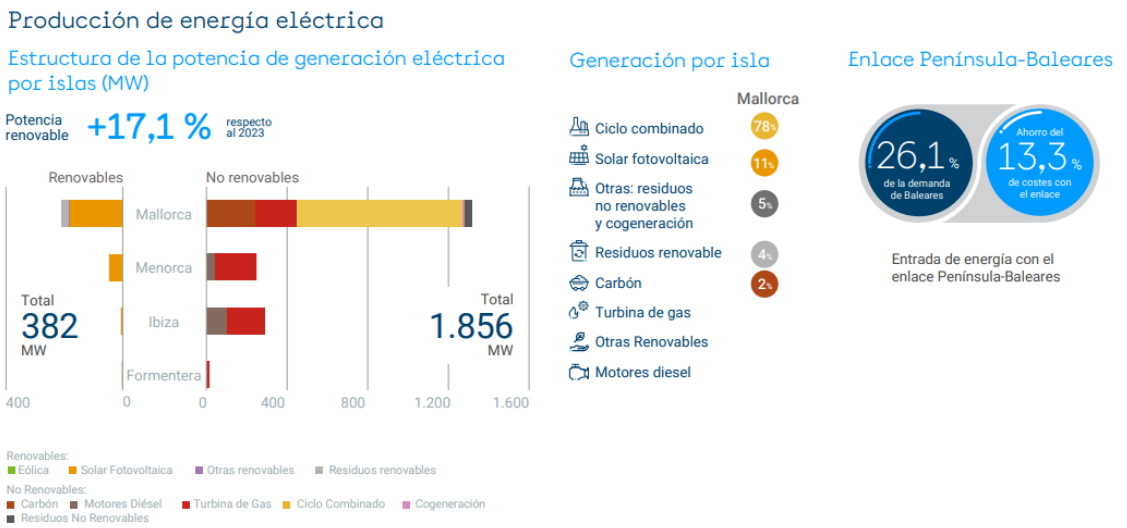


Figura 14 Producción de energía eléctrica y aportación del enlace Península-Baleares (2024). Fuente: Red Eléctrica de España (2025a), datos de 2024.

En conjunto, la estructura representada muestra que el sistema balear dispone de diferentes recursos para atender la demanda, pero continúa condicionado por su carácter no peninsular, por la dependencia parcial de la generación local y por la capacidad limitada de interconexión. Estas particularidades no permiten concluir por sí solas que la incorporación de nuevos puntos de recarga resulte viable o inviable, por lo que el análisis debe descender posteriormente a la información disponible sobre la red de distribución y las condiciones de acceso para nuevas demandas.

4.4.2. Estacionalidad y concentración territorial de la demanda

La planificación de la infraestructura de recarga en Mallorca debe considerar que la demanda potencial no se distribuye de forma uniforme ni a lo largo del año ni sobre el territorio. La

actividad turística incrementa la población presente y los desplazamientos durante la temporada alta, concentrando parte de la movilidad en el aeropuerto, los municipios costeros, los principales ejes viarios y las zonas con mayor capacidad alojativa.

Esta variación estacional también ha sido observada en otros territorios insulares del archipiélago. Raveendran et al. (2020), en un estudio aplicado a Menorca, identifican diferencias significativas entre los patrones de movilidad y demanda eléctrica de verano e invierno. Aunque sus resultados no son directamente extrapolables a Mallorca, el trabajo refuerza la necesidad de considerar la estacionalidad en la planificación de la movilidad eléctrica en islas turísticas.

En el caso de Mallorca, la ausencia de información pública completa y territorialmente desagregada sobre la flota de vehículos de alquiler impide cuantificar directamente su demanda de recarga. Por este motivo, el Modelo Pi representa esta presión de forma indirecta mediante variables como la capacidad alojativa, el turismo receptor, la población flotante, los puntos de interés y los principales nodos de transporte.

La concentración temporal y espacial de la demanda también depende de la misión de recarga. La recarga residencial compartida se asocia a periodos prolongados de estacionamiento; la recarga de destino y oportunidad, a la permanencia en hoteles, comercios, aparcamientos o equipamientos; y la recarga en ruta, a operaciones de menor duración y mayor necesidad de reducir el tiempo de recarga. Esta diferenciación permite evitar una distribución homogénea de la infraestructura y orientar su planificación hacia los distintos patrones de uso presentes en el territorio.

La estacionalidad constituye, por tanto, un criterio relevante para caracterizar la demanda, pero no permite determinar por sí sola la viabilidad eléctrica de una instalación. Esta cuestión se aborda de forma preliminar en el apartado siguiente mediante el análisis de la capacidad de acceso firme publicada en los nudos de la red de distribución.

4.4.3. Capacidad de acceso firme como indicador de oportunidad eléctrica preliminar

La información pública sobre capacidad de acceso firme de demanda permite incorporar al Modelo Pi una aproximación territorial a las condiciones de la red de distribución. Los datos publicados por e-distribución (2026) identifican los nudos de red, el nivel de tensión de las barras y la capacidad firme disponible para nuevas solicitudes de demanda en el escenario considerado en cada actualización.

La capacidad firme disponible representa la potencia activa máxima adicional que puede admitirse en un nudo bajo las condiciones publicadas y sin considerar refuerzos adicionales. Estos valores tienen carácter informativo: no constituyen una reserva de potencia ni garantizan

la conexión de una instalación concreta, que debe evaluarse posteriormente mediante el correspondiente procedimiento de acceso y conexión.

Para interpretar la información utilizada se consideran principalmente tres variables:

- **Nivel de tensión (kV):** identifica el nivel de tensión del punto de conexión publicado. En los registros analizados predominan los nudos de 15 kV, aunque esto no implica que toda infraestructura de recarga deba conectarse necesariamente a dicho nivel.
- **Capacidad firme ocupada (MW):** recoge capacidad asociada a instalaciones conectadas, permisos vigentes y solicitudes que ya disponen de un estudio favorable, por lo que no equivale directamente al consumo existente.
- **Capacidad firme disponible (MW):** expresa la potencia adicional publicada para el nudo y escenario considerado. Un valor de 0,00 MW no implica automáticamente la inviabilidad de una instalación en su entorno, ya que pueden existir otras alternativas de conexión, potencias diferentes o actuaciones de refuerzo.

  A continuación, se presenta una selección de nudos de la red de distribución de Mallorca y sus valores publicados de capacidad firme.

Municipio	Nombre Subestación	Nivel de Tensión (kV)	Capacidad firme disponible (MW)	Capacidad de acceso firme de demanda ocupada (MW)
Alcúdia	ALCUDIA	15	0,00	65,35
Andratx	ANDRATX	15	0,00	74,26
Artà	ARTA	15	0,00	29,85
Bunyola	BUNYOLA	15	8,04	32,16
Bunyola	VELES	15	18,98	19,03
Calvià	CALVIA	15	9,13	53,81
Calvià	P.NOVA	15	19,81	41,15
Felanitx	COLOM	15	0,00	33,77
Inca	INCA	15	2,08	38,30
Inca	VINYETA	15	0,00	33,94
Llucmajor	CALABLAVA	15	10,84	29,18
Llucmajor	LLUCMAJOR	15	0,00	47,24
Manacor	MANACOR	15	5,18	70,17
Marratxí	MARRATXI	15	0,00	43,19
Palma de Mallorca	AGUSTI	15	0,00	34,38
Palma de Mallorca	ARENAL	15	9,77	53,40

Tabla 7 Selección de nudos de la red de distribución de Mallorca y capacidad de acceso firme de demanda publicada. Fuente: e-distribución (2026), consulta marzo de 2026. Elaboración propia.

Los datos muestran diferencias territoriales entre nudos con capacidad firme positiva y otros con capacidad disponible igual a 0 MW. Esta información permite reconocer condiciones eléctricas

preliminares relativamente más favorables, pero no determinar por sí sola la viabilidad de un emplazamiento ni obtener una capacidad conjunta mediante la suma de los distintos nudos.

Además, los valores representan la situación de la red en la fecha de consulta y pueden modificarse como consecuencia de nuevas conexiones, permisos o actuaciones sobre la red. Por este motivo, dentro del Modelo Pi se utilizan como indicador comparativo de oportunidad eléctrica preliminar.

4.4.3.1. Tratamiento en QGIS y función en el Modelo Pi

La información publicada por e-distribución se incorporó al proyecto QGIS y se filtró territorialmente para conservar los registros correspondientes a Mallorca. La capa original, que incluye nudos con capacidad firme positiva y nula, se mantuvo como referencia para conservar la trazabilidad de la información.

Para construir el indicador de oportunidad eléctrica se generó una capa de trabajo con los nudos que presentaban capacidad firme disponible superior a 0 MW. Como resultado se obtuvieron 14 nudos, identificados mediante el campo ID_NODO.

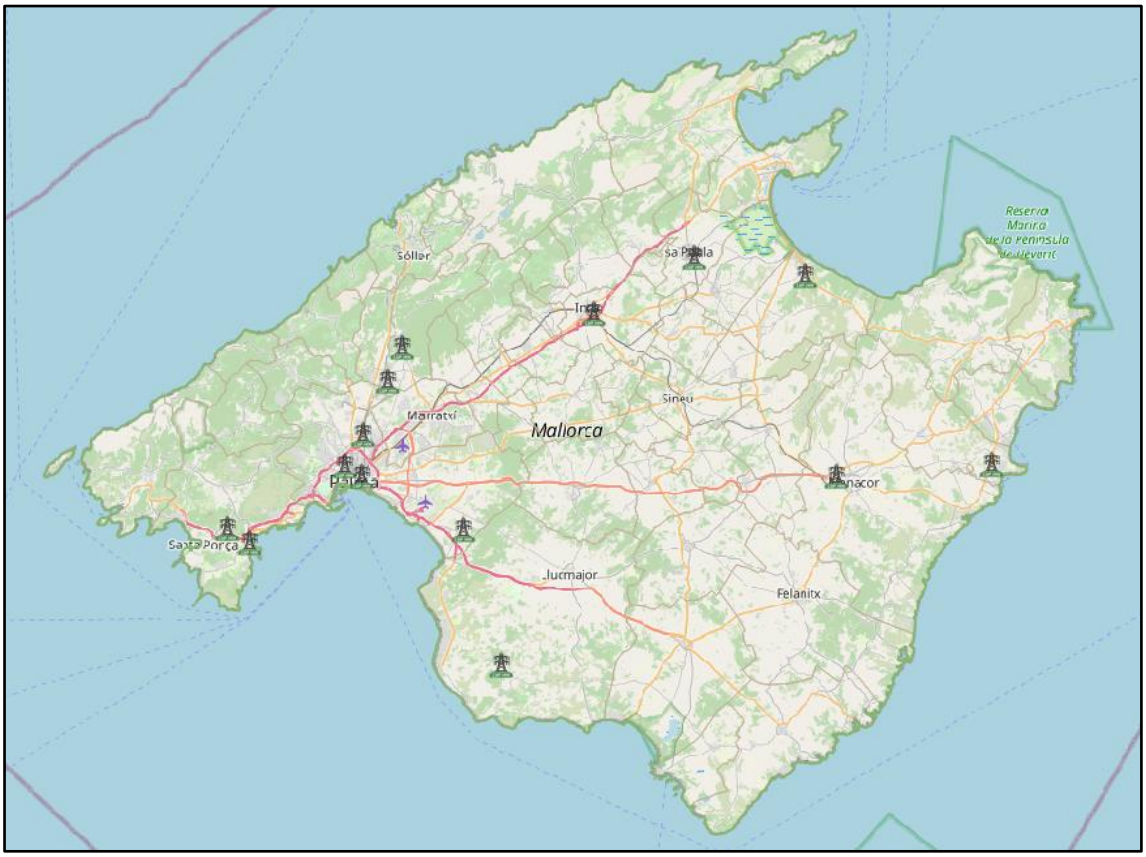


Figura 15 Nudos de la red de distribución de Mallorca con capacidad firme de demanda positiva publicada. Fuente: e-distribución, consulta marzo de 2026. Elaboración propia en QGIS.

La utilización de los nudos con capacidad positiva para construir el indicador no implica que las zonas próximas a nudos con capacidad publicada igual a 0 MW queden excluidas del Modelo Pi.

Estos registros se conservaron en la capa original como referencia, mientras que el cálculo de OP_ELEC se realizó a partir de los nudos para los que la distribuidora publicaba capacidad disponible positiva. La exclusión de una celda depende exclusivamente de VIAB_CELDA, mientras que OP_ELEC modifica su prioridad relativa dentro de los submodelos.

Para incorporar esta información a la malla común del Modelo Pi, cada celda se vinculó al nudo con capacidad firme positiva más cercano. A partir de esta relación se construyeron dos indicadores normalizados. El primero, S_CAP_ELEC, representa la capacidad de acceso firme publicada para el nudo asociado a cada celda. Los valores positivos disponibles en la capa utilizada, comprendidos entre 1,14 MW y 19,81 MW, se normalizaron linealmente entre 0 y 10:

$$S_CAP_ELEC = 10 \cdot \frac{ELEC_CAP_MW - 1{,}14}{19{,}81 - 1{,}14}$$

El segundo indicador, S_PROX_ELEC, representa la proximidad de cada celda al mismo nudo asociado. Se asigna una puntuación máxima de 10 hasta una distancia de 500 m, reduciéndose linealmente hasta alcanzar un valor de 0 a partir de 5.000 m.

Ambos componentes se combinan con igual ponderación para obtener el indicador de oportunidad eléctrica preliminar:

$$OP_ELEC = 0{,}50 \cdot S_CAP_ELEC + 0{,}50 \cdot S_PROX_ELEC$$

A continuación, se muestra la representación en QGIS de este indicador:

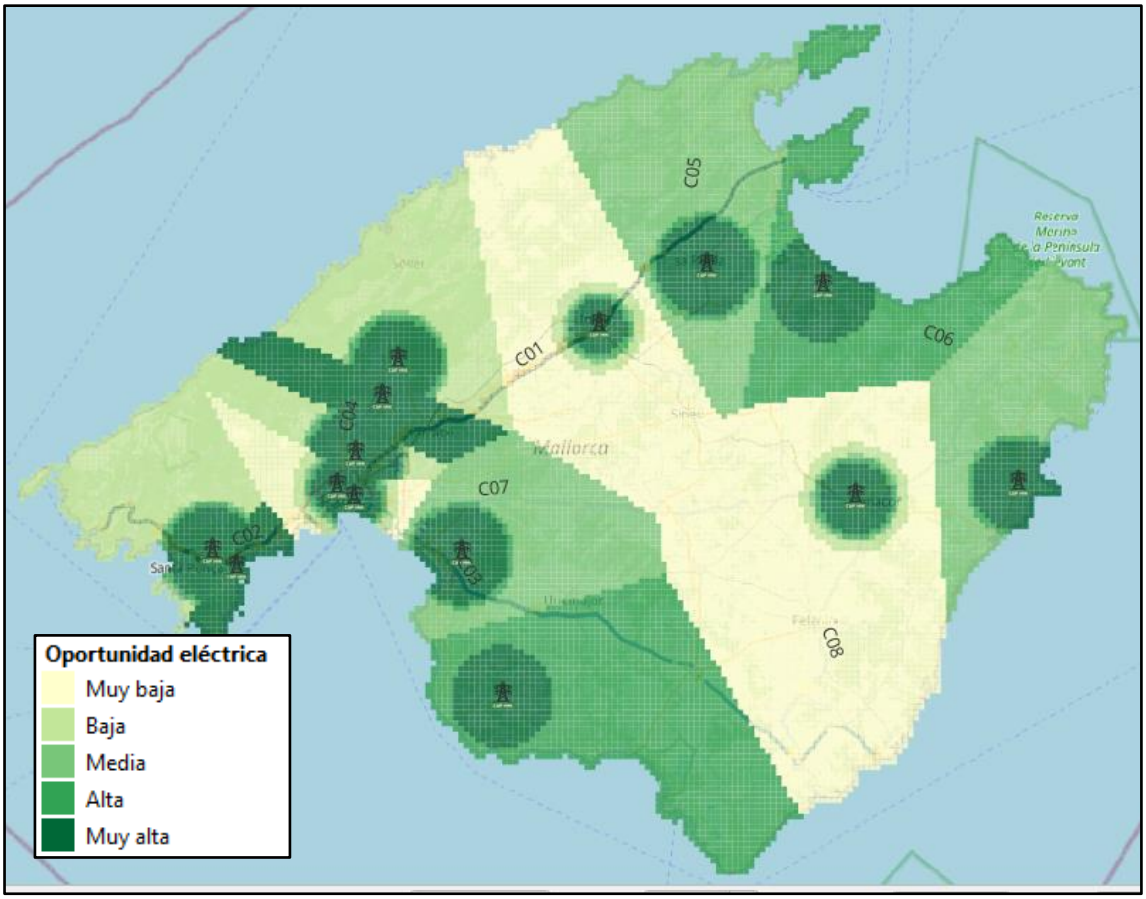


Figura 16 Distribución espacial de la oportunidad eléctrica preliminar (OP_ELEC) en Mallorca. Fuente: e-distribución (2026 datos consultados en marzo de 2026). Elaboración propia en QGIS.

De esta forma, una celda obtiene una mayor oportunidad eléctrica cuando presenta simultáneamente una mayor capacidad firme publicada en el nudo asociado y una menor distancia a este. OP_ELEC se incorpora posteriormente como criterio graduado en los tres submodelos y no funciona como filtro de exclusión.

La capacidad efectiva de conexión debe comprobarse posteriormente mediante una solicitud específica ante la empresa distribuidora, considerando la potencia requerida, el punto de conexión y los posibles refuerzos necesarios.

4.4.4. Procedimientos de Operación del Sistema

La operación del sistema eléctrico se encuentra regulada mediante procedimientos de carácter técnico que establecen las condiciones necesarias para garantizar la seguridad, la calidad y la continuidad del suministro. En los sistemas eléctricos no peninsulares, estas disposiciones adquieren especial relevancia debido a sus características operativas y a su menor grado de interconexión con el sistema peninsular.

Entre los procedimientos aplicables al contexto de las Illes Balears destacan los relacionados con el funcionamiento de los sistemas eléctricos no peninsulares y con el control de las condiciones de operación de la red. En particular:

- **P.O. SENP 1. Funcionamiento de los sistemas eléctricos no peninsulares:** establece los criterios generales de seguridad y funcionamiento aplicables a estos sistemas. Incluye aspectos relacionados con la frecuencia, la tensión, los niveles de carga, las reservas de regulación y la respuesta ante contingencias, con el objetivo de garantizar la continuidad y la calidad del suministro (Resolución de 11 de diciembre de 2019).
- **P.O. SEIE-8.2. Criterios de operación:** regula las actuaciones del operador sobre las instalaciones de producción y transporte. También contempla la operación del sistema en diferentes situaciones, el control de tensión y las medidas que pueden aplicarse en estados de alerta o emergencia (Resolución de 24 de julio de 2012).

Desde la perspectiva de la movilidad eléctrica, estos procedimientos permiten contextualizar las condiciones generales bajo las que deben integrarse nuevas cargas en el sistema, especialmente cuando presentan elevada potencia o una concentración temporal significativa. Sin embargo, no permiten determinar directamente la capacidad de conexión de un punto de recarga concreto, ya que esta depende del correspondiente procedimiento de acceso y conexión y de las características de la red de distribución en el emplazamiento considerado.

Por este motivo, los procedimientos de operación no se incorporan como variables espaciales del Modelo Pi. Su función dentro del caso de estudio es aportar el marco técnico necesario para interpretar con prudencia la información pública de capacidad y evitar que la proximidad a un nudo o la existencia de capacidad de acceso publicada se considere por sí sola una garantía de conexión.

4.4.5. Tramitación y entidades competentes

La implantación de infraestructura de recarga puede requerir la intervención de diferentes agentes en función de la potencia, el emplazamiento, el tipo de conexión y las instalaciones eléctricas asociadas.

- **Empresa distribuidora.** En Mallorca, e-distribución gestiona las solicitudes de acceso y conexión cuando resulta necesario un nuevo suministro, una ampliación de potencia o una actuación sobre la red. La evaluación se realiza sobre una solicitud concreta, considerando la potencia requerida y el punto de conexión propuesto. Los mapas públicos de capacidad aportan información preliminar, pero no sustituyen este procedimiento ni garantizan la potencia finalmente otorgable.

- **Operador del sistema.** Red Eléctrica supervisa la seguridad y el equilibrio general del sistema eléctrico. Su intervención directa en un proyecto concreto dependerá de las características de la conexión y de su posible afección a la red de transporte o a la operación del sistema.
- **Administración local.** Los ayuntamientos intervienen en los aspectos urbanísticos, la ocupación del espacio público y la tramitación municipal asociada a la instalación. De acuerdo con la Guía práctica para los municipios. Despliegue de infraestructura de recarga del vehículo eléctrico (IDAE/FEMP/AEDIVE, 2025), la instalación de puntos de recarga puede tramitarse mediante declaración responsable en los supuestos previstos por la normativa, sin perjuicio de las facultades posteriores de comprobación, control e inspección de la Administración. Esta simplificación no resulta aplicable, entre otros casos, cuando existe ocupación o uso del dominio público, afección a bienes de interés cultural o determinadas instalaciones eléctricas de elevada potencia. La guía también destaca la conveniencia de coordinar la planificación urbanística municipal con los operadores del sistema de distribución para anticipar la disponibilidad de potencia y reducir los tiempos de tramitación.
- **Administración autonómica.** La administración competente en materia de industria y energía interviene en el registro y puesta en servicio de la instalación de acuerdo con sus características y con la normativa de seguridad industrial aplicable. En las Illes Balears, las instalaciones situadas en zonas de acceso público deben inscribirse mediante el procedimiento autonómico habilitado para tal finalidad.

Por tanto, la identificación de un emplazamiento candidato mediante el Modelo Pi no acredita el cumplimiento de los requisitos técnicos y administrativos. Estos deberán comprobarse posteriormente para cada proyecto.

4.4.6. Marco de obligatoriedad y tipologías de emplazamiento

El despliegue de la infraestructura de recarga en Mallorca no solo responde a la evolución de la demanda, sino que también está condicionado por un marco normativo que establece obligaciones de instalación en determinadas tipologías de emplazamiento:

- **Estaciones de servicio.** El artículo 15 de la Ley 7/2021 establece obligaciones de instalación de infraestructura de recarga para determinadas instalaciones de suministro de combustibles en función de su volumen anual de ventas. Este régimen ha sido actualizado posteriormente, incorporando nuevas exigencias de potencia y periodos de referencia. Estas obligaciones justifican la consideración de las estaciones de servicio

como elementos funcionales relevantes, aunque no implican que todas presenten la misma prioridad territorial o las mismas condiciones eléctricas.

- **Edificios y aparcamientos no residenciales.** El Real Decreto-ley 29/2021 introdujo dotaciones mínimas de infraestructura de recarga para determinados edificios de uso distinto al residencial privado con zonas de aparcamiento superiores a veinte plazas. Su consideración dentro del análisis responde tanto a estas obligaciones como a su función potencial como espacios de recarga de destino.
- **Infraestructura de acceso público.** El Real Decreto 184/2022 define al operador del punto de recarga como la persona física o jurídica titular de los derechos de explotación de la estación. El operador puede prestar directamente el servicio o hacerlo mediante terceros y acuerdos de interoperabilidad.

Dentro del Modelo Pi, estas disposiciones se utilizan como referencia para identificar instalaciones y usos vinculados funcionalmente a la movilidad y a la recarga. Sin embargo, la existencia de una obligación normativa no garantiza por sí sola la viabilidad territorial, la disponibilidad de suelo, la prioridad dentro del modelo ni la capacidad de conexión.

4.4.7. Cuellos de botella y condicionantes del despliegue

A pesar de la existencia de objetivos y obligaciones normativas, la ejecución de una infraestructura de recarga puede estar condicionada por factores técnicos, territoriales, administrativos y económicos.

La propia guía municipal identifica la tramitación y la coordinación entre ayuntamientos, promotores y operadores de distribución como factores capaces de prolongar el despliegue, por lo que recomienda procedimientos claros y una planificación previa de las necesidades de conexión.

Acceso y conexión. Una capacidad reducida en el punto de conexión inicialmente considerado puede hacer necesario estudiar alternativas, ajustar la potencia solicitada o ejecutar actuaciones sobre la red. La incidencia de estas condiciones solo puede determinarse mediante el estudio específico realizado para cada solicitud.

Coordinación administrativa. Según las características del proyecto, pueden intervenir la empresa distribuidora, la administración local y la administración autonómica competente en seguridad industrial. La declaración responsable municipal agiliza determinados trámites, pero no sustituye los procedimientos eléctricos y técnicos aplicables.

Condiciones territoriales y económicas. La disponibilidad y titularidad del suelo, las obras necesarias, la configuración de la acometida, los requisitos ambientales y

urbanísticos y el coste de las instalaciones asociadas pueden condicionar la ejecución final del proyecto.

Estos factores justifican que el Modelo Pi se utilice como una herramienta de priorización previa. Su función es reducir el ámbito de búsqueda e identificar zonas que requieren una evaluación posterior de mayor detalle, pero no determinar los plazos, los costes ni la viabilidad definitiva de cada instalación.

4.5 Diagnóstico y evolución del parque móvil en Mallorca

Una vez analizados los condicionantes territoriales y eléctricos, resulta necesario caracterizar la evolución y distribución del parque móvil susceptible de generar demanda de recarga. Para ello, el diagnóstico se desarrolla en dos escalas complementarias.

En primer lugar, las series insulares de la Dirección General de Tráfico correspondientes al periodo 2020–2024 permiten analizar la evolución del parque de turismos enchufables y su penetración respecto al conjunto del parque de Mallorca. En segundo lugar, los Datos Municipales Generales de la DGT de 2025 permiten distribuir territorialmente esta presión y construir los indicadores municipales utilizados en el Modelo Pi.

Esta diferenciación evita mezclar el diagnóstico histórico insular con las variables empleadas directamente en el análisis multicriterio. Los datos insulares permiten identificar la tendencia general de electrificación, mientras que la información municipal se utiliza para reconocer diferencias territoriales entre los municipios de Mallorca.

4.5.1. Evolución histórica y penetración de los turismos enchufables

Para caracterizar la evolución tecnológica del parque móvil de Mallorca, se utilizan los datos del Panel del Parque de Vehículos de la Dirección General de Tráfico (DGT, 2025) correspondientes al periodo 2020–2024. Esta fuente permite diferenciar los turismos susceptibles de conexión a la red eléctrica según su tecnología de propulsión.

A efectos del presente estudio, se distinguen las siguientes categorías:

- **BEV (***Battery Electric Vehicle***):** Vehículos 100% eléctricos con dependencia total de la red.
- **PHEV (***Plug-in Hybrid Electric Vehicle***):** Híbridos enchufables que requieren carga para maximizar su eficiencia.
- **REEV (***Range Extended Electric Vehicle***):** Eléctricos de autonomía extendida con toma de corriente.

La suma de estas tres categorías se utiliza para representar la flota de turismos enchufables existente en Mallorca. Esta clasificación tecnológica debe diferenciarse del distintivo ambiental CERO empleados posteriormente en el análisis municipal, ya que ambos indicadores proceden

de agrupaciones estadísticas diferentes y no representan necesariamente el mismo conjunto de vehículos.

La evolución registrada muestra un crecimiento sostenido de la movilidad eléctrica en la isla, tal como se representa en la figura siguiente.

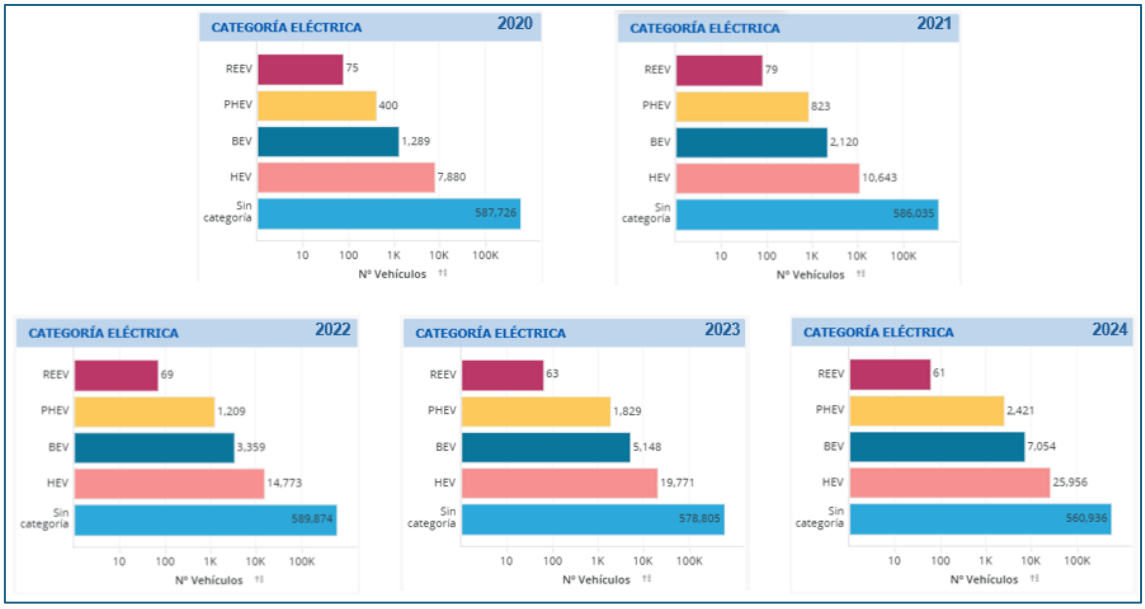


Figura 17 Evolución histórica del parque de turismos en Mallorca segmentado por categoría eléctrica (2020 a 2024). Fuente: Panel de Datos del Parque de Vehículos (DGT, 2025). Elaboración propia.

El crecimiento más acusado corresponde a los vehículos eléctricos de batería. El parque BEV pasó de 1.289 turismos en 2020 a 7.054 en 2024, lo que supone un incremento acumulado aproximado del 447 %. Esta evolución resulta especialmente relevante para la planificación de la infraestructura, dado que estos vehículos dependen íntegramente de la recarga eléctrica.

Los turismos híbridos enchufables también experimentaron un aumento significativo, pasando de 400 unidades en 2020 a 2.421 en 2024. Aunque estos vehículos disponen de un sistema de propulsión alternativo, su utilización en modo eléctrico requiere igualmente el acceso a infraestructura de recarga doméstica, compartida o pública.

Por su parte, los vehículos eléctricos de autonomía extendida mantienen una presencia residual, con 61 unidades registradas en 2024. En consecuencia, la evolución de la demanda potencial se encuentra principalmente condicionada por el crecimiento de los segmentos BEV y PHEV.

En 2024, los BEV representaban aproximadamente el 74 % de la flota enchufable de turismos, mientras que los PHEV suponían alrededor del 25 %. Esta composición indica un predominio creciente de los vehículos completamente eléctricos, aunque no permite determinar por sí sola la potencia, la tipología o el número de cargadores necesarios, ya que estos factores dependen también de los patrones de movilidad, la disponibilidad de aparcamiento privado y la misión de recarga predominante.

Los principales indicadores de evolución se resumen en la tabla siguiente:

Año	BEV	PHEV	REEV	EV Fleet BEV+PHEV+REEV	Incorporación neta anual estimada	T. turismos en Mallorca	EV Uptake
2020	1.289	400	75	1.764	—	—	—
2021	2.120	823	79	3.022	1.258	—	—
2022	3.359	1.209	69	4.637	1.615	—	—
2023	5.148	1.829	63	7.040	2.403	—	—
2024	7.054	2.421	61	9.536	2.496	580.467	1,64%

Tabla 8 Evolución de la flota eléctrica, incorporaciones netas estimadas y tasa de penetración EV Uptake en Mallorca (2020–2024). Fuente: Panel de Datos del Parque de Vehículos (DGT, 2025). Elaboración propia.

La flota de turismos enchufables pasó de 1.764 unidades en 2020 a 9.536 en 2024, multiplicándose por aproximadamente 5,4 durante el periodo analizado. Las incorporaciones netas anuales estimadas, calculadas como la diferencia entre la flota registrada en dos años consecutivos, también muestran una tendencia creciente. Este indicador no representa ventas o matriculaciones brutas, pero permite aproximar el ritmo de aumento del parque enchufable.

Para contextualizar el peso de esta flota dentro del conjunto de turismos registrados en Mallorca, se calcula la tasa de penetración del vehículo eléctrico.

$$EV\ Uptake = \frac{EV\ Fleet}{Total\ de\ turismos} \times 100$$

$$EV\ Uptake = \frac{9.536}{580.467} \times 100 = 1{,}64\%$$

El resultado indica que los turismos enchufables representaban aproximadamente el 1,64 % del parque total de turismos de Mallorca en 2024. Aunque su participación relativa todavía era reducida, el crecimiento observado evidencia una expansión progresiva de la población de vehículos susceptible de utilizar infraestructura de recarga.

Desde la perspectiva del Modelo Pi, esta evolución refuerza la necesidad de anticipar el crecimiento de la demanda en ámbitos residenciales, destinos turísticos y comerciales, y corredores de movilidad. Sin embargo, los datos insulares no permiten determinar su distribución interna entre municipios. Por este motivo, el apartado siguiente incorpora los Datos Municipales Generales de la DGT de 2025, utilizados para trasladar esta presión a la escala territorial del modelo.

4.5.2. Parque municipal y presión residencial electrificada

La evolución histórica permite conocer el crecimiento general de la movilidad eléctrica en Mallorca, pero no su distribución territorial. Para trasladar el diagnóstico a la escala municipal empleada por el Modelo Pi, se incorporan los Datos Municipales Generales de la Dirección General de Tráfico correspondientes a 2025 (DGT, 2026**)**, que incluyen información sobre el parque de vehículos por municipio, tipo de vehículo y distintivo ambiental.

A partir de esta fuente se identificó el parque municipal de turismos y se estimó el número de turismos con distintivo CERO. Dado que la DGT publica esta categoría para el conjunto del parque municipal y no exclusivamente para los turismos, se realizó una estimación proporcional, aplicando a los vehículos con distintivo CERO la participación de los turismos sobre el parque total del municipio:

$$Est_Tur_0 = Distintivo\ CERO \cdot \frac{Parque\ municipal\ de\ turismos}{Parque\ total\ municipal}$$

Donde:

- Est_Tur_0: estimación municipal de turismos con distintivo CERO.
- Distintivo CERO: número total de vehículos municipales incluidos en esta categoría ambiental.
- Parque municipal de turismos: número de vehículos clasificados como turismos.
- Parque total municipal: conjunto de vehículos registrados en el municipio.

El resultado se interpreta como una aproximación territorial y no como un recuento exacto de turismos eléctricos o enchufables. La estimación parte del supuesto de una distribución proporcional del distintivo CERO entre los distintos tipos de vehículos del parque municipal. La clasificación por distintivo ambiental utilizada en este análisis municipal tampoco debe considerarse equivalente a la clasificación tecnológica BEV, PHEV y REEV empleada en la serie histórica.

Para su incorporación al Modelo Pi se utilizaron dos indicadores normalizados: S_PARQ_TUR, correspondiente al parque municipal de turismos, y S_TUR_0, asociado a la estimación de turismos con distintivo CERO. La normalización se realizó mediante el procedimiento definido previamente en el capítulo de Metodología, por lo que no se reproduce nuevamente en este apartado.

Estos indicadores se incorporaron posteriormente a la construcción de la presión residencial municipal electrificada (DEM_RES_EV).

4.5.3. Flota de alquiler y tratamiento en el Modelo Pi

La actividad de alquiler de vehículos constituye un componente relevante de la movilidad en Mallorca, especialmente durante la temporada turística. Su funcionamiento concentra desplazamientos en ámbitos como el Aeropuerto de Son Sant Joan, las zonas hoteleras, los principales corredores viarios y los municipios costeros.

Sin embargo, no se dispone de información pública consolidada y territorialmente desagregada que permita determinar el número total de vehículos de alquiler que operan en la isla, su distribución espacial o la proporción correspondiente a vehículos eléctricos. Las referencias disponibles proceden principalmente de noticias y comunicaciones institucionales sobre la necesidad de actualizar el conocimiento de estas flotas, por lo que no resultan suficientes para cuantificar su demanda energética.

La Ley 10/2019 establece una evolución progresiva hacia la incorporación de vehículos libres de emisiones en determinadas flotas de alquiler. No obstante, su aplicación no permite estimar directamente la composición tecnológica actual del conjunto del sector.

Por este motivo, el *rent-a-car* no se incorpora mediante una asignación directa de vehículos o consumo eléctrico. Su influencia se representa indirectamente mediante variables asociadas a la actividad turística, la población flotante, los principales nodos de transporte y los corredores de movilidad.

4.6 Análisis funcional de la infraestructura existente

Una vez caracterizada la evolución del parque móvil, este apartado analiza la infraestructura de recarga existente desde una perspectiva funcional y territorial. El objetivo es identificar su distribución actual, integrar las distintas fuentes disponibles y obtener indicadores de cobertura que puedan incorporarse posteriormente a los submodelos del Modelo Pi.

4.6.1. Segmentación por misión de carga

La infraestructura existente se interpreta de acuerdo con las tres misiones de recarga consideradas en el Modelo Pi. Aunque la potencia constituye un indicador relevante, la misión de una instalación depende también de su ubicación, tiempo de permanencia esperado y tipo de usuario, por lo que no se establece una equivalencia rígida exclusivamente a partir de los kW disponibles.

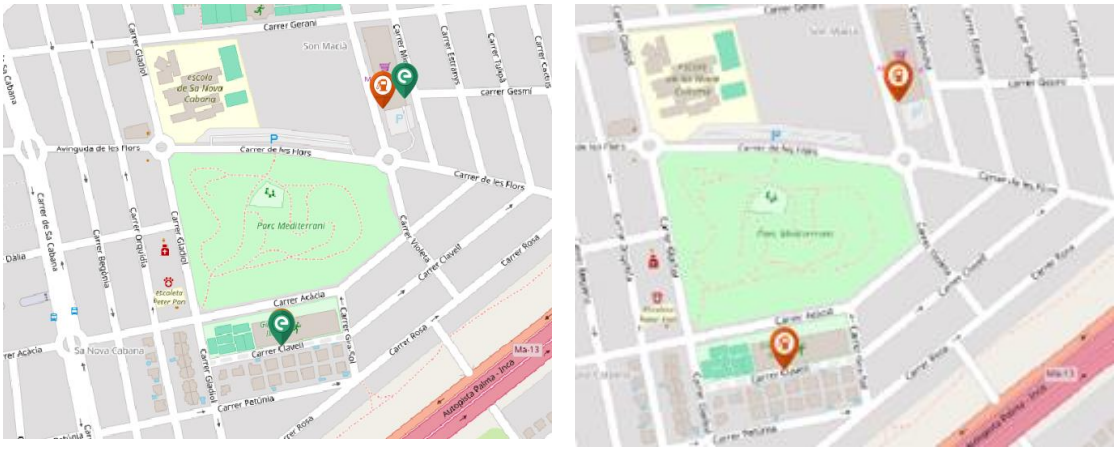
- Recarga residencial compartida: asociada principalmente a estancias prolongadas y a ámbitos residenciales donde existe menor disponibilidad de aparcamiento privado con recarga.

- Recarga de destino y oportunidad: vinculada a hoteles, aparcamientos, centros comerciales, equipamientos y otros puntos de interés donde el vehículo permanece estacionado durante la realización de otra actividad.
- Recarga asociada a corredores interurbanos: orientada a desplazamientos entre municipios y a situaciones donde el tiempo de recarga adquiere mayor importancia.

Esta clasificación permite analizar la infraestructura existente no solo por su presencia territorial, sino también por su capacidad para responder a necesidades de recarga diferentes.

4.6.2. Identificación de vacíos de cobertura espacial (Gaps)

Para identificar los vacíos de cobertura espacial se elaboró previamente una capa unificada de puntos de recarga existentes en QGIS. Se integraron tres fuentes: el Geoportal del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2026), la red MELIB (Institut Balear de l'Energia [IBE], s. f.) y Electromaps (Electromaps, s. f.). Dado que una misma instalación podía aparecer registrada en varias fuentes, se aplicó una depuración espacial de duplicados mediante un criterio de proximidad de 30 m.



a) Situación inicial con registros solapados.

b) Resultado tras aplicar el criterio de proximidad de 30 m

Figura 18 Ejemplo de depuración de duplicidades entre fuentes de puntos de recarga. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS.

La Figura anterior muestra cómo una misma ubicación funcional de recarga puede aparecer representada en varias fuentes. Para evitar la doble contabilización de infraestructura, se conserva un único registro por ubicación, priorizando los puntos procedentes del Geoportal y, en segundo lugar, los de la red MELIB. Los registros de Electromaps se mantienen únicamente cuando no presentan coincidencia espacial con las fuentes anteriores.

Una vez aplicado este proceso de depuración, se obtiene una capa única de puntos de recarga existentes, que constituye la base cartográfica de partida para el análisis de cobertura espacial.

Esta capa permite representar de forma conjunta la infraestructura actualmente identificada en el ámbito de estudio y facilita su posterior análisis territorial mediante herramientas SIG.

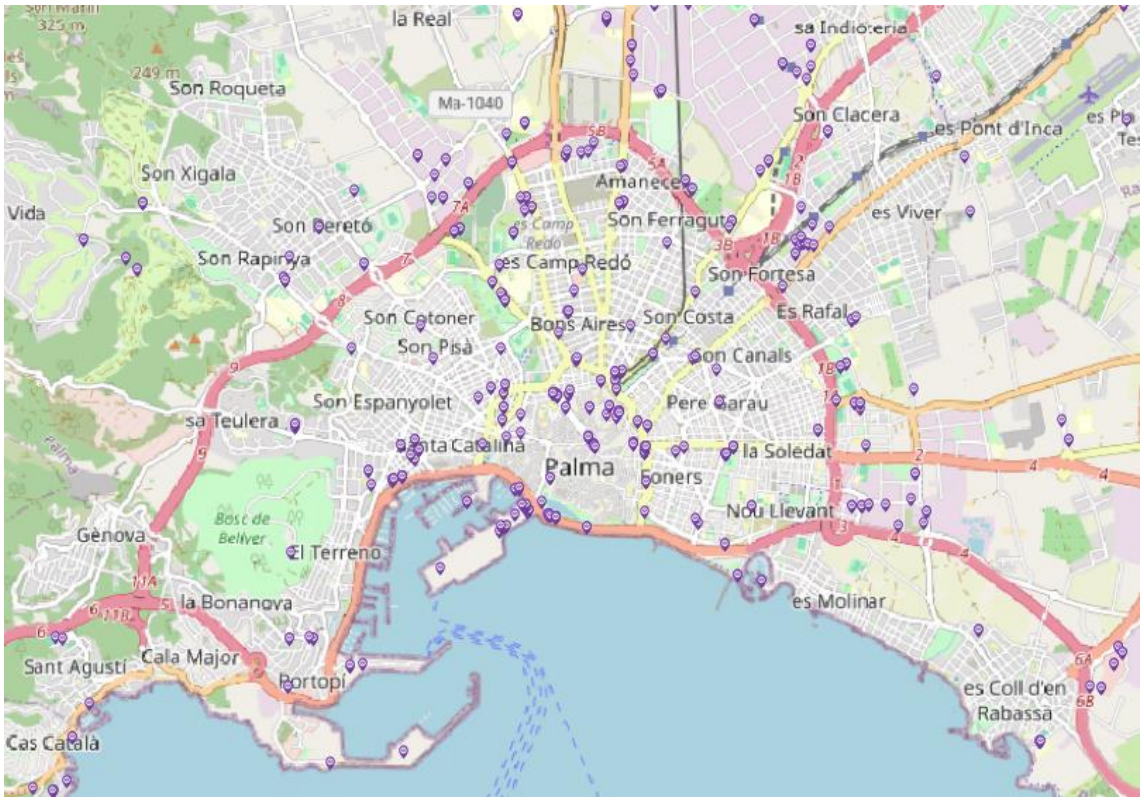


Figura 19 Capa unificada de puntos de recarga existentes tras el proceso de depuración. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS.

A partir de esta capa depurada se construyeron los indicadores de déficit de cobertura utilizados por el Modelo Pi. DEF_COB_GEN representa el déficit de cobertura general y se incorpora a los submodelos de destino y corredores, mientras que DEF_COB_RES adapta este análisis a las características de la recarga residencial compartida. Ambos indicadores se expresan en una escala de 0 a 10, donde los valores superiores representan un mayor déficit de cobertura de la infraestructura existente.

Estos indicadores no determinan por sí solos la prioridad de una celda ni funcionan como criterios de exclusión, sino que complementan la demanda y el resto de las variables consideradas en cada submodelo.

Uno de los casos identificados corresponde al entorno del Aeropuerto de Son Sant Joan, principal punto de entrada de visitantes a la isla y ámbito estrechamente relacionado con la movilidad turística y el alquiler de vehículos. Aunque existen puntos de recarga en áreas próximas, como Can Pastilla o el entorno del centro comercial FAN, la infraestructura de acceso público identificada en el entorno inmediato presenta una cobertura reducida en relación con la relevancia funcional de este nodo.

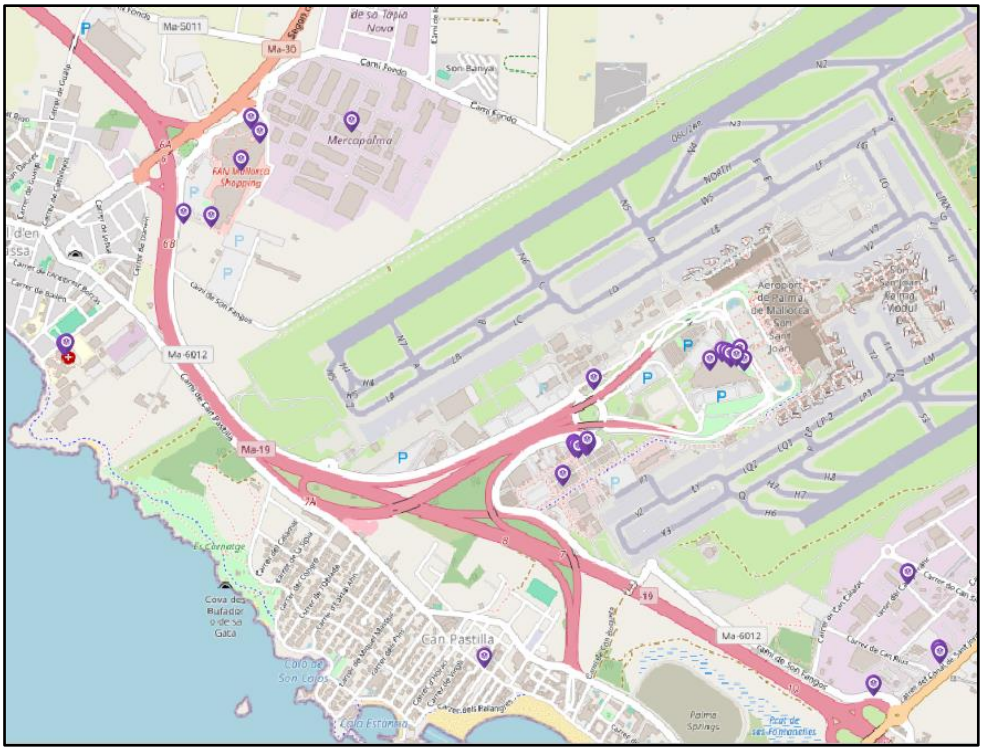


Figura 20 Cobertura de puntos de recarga en el entorno del Aeropuerto de Son Sant Joan y áreas próximas. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS.

Una situación similar se observa en el entorno del Hospital Universitario Son Espases, equipamiento sanitario de referencia de Mallorca, donde la infraestructura pública identificada en las proximidades presenta una cobertura reducida. Los puntos más próximos localizados en el análisis corresponden, además, a instalaciones asociadas a la flota de EMAYA en Son Pacs, cuya función no es equivalente a la recarga pública del hospital.



Figura 21 Puntos de recarga identificados en el entorno del Hospital Universitario Son Espases y área de Son Pacs. Fuente: MITECO (2026), IBE (s. f.) y Electromaps (s. f.). Elaboración propia en QGIS.

Estos ejemplos muestran que la existencia de infraestructura próxima no implica necesariamente una cobertura funcional equivalente para todos los usos. Por este motivo, el Modelo Pi incorpora el déficit de cobertura conjuntamente con la demanda asociada a cada misión de recarga.

4.6.3. Síntesis del diagnóstico de la infraestructura existente

El análisis realizado muestra que la distribución de la infraestructura existente debe interpretarse conjuntamente con la función de recarga, los patrones de movilidad, las condiciones territoriales y la capacidad eléctrica disponible. La cobertura espacial por sí sola no permite determinar dónde resulta prioritario ampliar la red, ya que una misma distancia a un cargador puede responder de forma diferente a las necesidades de un residente, un usuario en destino o un vehículo que circula por un corredor interurbano.

4.7 Caracterización espacial de la demanda residencial compartida

La necesidad de infraestructura de recarga residencial compartida no depende únicamente del número de habitantes o vehículos existentes en un municipio. También está condicionada por la forma en que se organiza el tejido urbano y por la posibilidad de que las viviendas dispongan de aparcamiento privado donde instalar un punto de recarga vinculado.

Para representar esta situación, el Modelo Pi combina tres componentes complementarios. En primer lugar, la presión residencial electrificada municipal permite identificar los municipios con una mayor concentración relativa de población, turismos y vehículos susceptibles de requerir recarga. En segundo lugar, la tipología residencial permite distribuir esta presión entre diferentes tejidos urbanos. Finalmente, el déficit relativo de aparcamiento privado permite reconocer las parcelas en las que la instalación de recarga vinculada puede resultar menos accesible.

Estos componentes no representan directamente el número de sesiones de carga ni permiten identificar individualmente las viviendas sin garaje. Su combinación se utiliza para caracterizar comparativamente los ámbitos residenciales con mayor necesidad potencial de infraestructura de recarga compartida.

4.7.1. Extracción y clasificación de los ámbitos residenciales

A partir de la capa de calificaciones urbanísticas utilizada en el apartado anterior, se seleccionaron los polígonos correspondientes a usos residenciales. Esta operación permitió generar una capa específica denominada Tipologia residencial, utilizada como soporte espacial para distribuir la presión residencial dentro de cada municipio.

La capa diferencia los ámbitos residenciales según su clasificación urbanística, distinguiendo entre núcleo antiguo, residencial plurifamiliar intensivo, residencial plurifamiliar extensivo,

residencial unifamiliar intensivo y residencial unifamiliar extensivo. Estas categorías permiten reconocer estructuras urbanas con distintas características edificatorias y diferente predisposición potencial para la instalación de recarga vinculada.

La clasificación residencial no permite determinar directamente si una vivienda dispone de garaje. Su función es diferenciar el tipo de tejido urbano y facilitar la posterior integración con el indicador de déficit relativo de aparcamiento privado. De este modo, la tipología residencial aporta el contexto urbano, mientras que la información catastral permite aproximar la disponibilidad de aparcamiento en cada parcela.

A continuación, se muestra la distribución de las tipologías residenciales en el entorno de Palma y su área metropolitana. La representación permite observar la coexistencia de tejidos residenciales con características urbanísticas diferentes, desde los núcleos compactos y plurifamiliares hasta los desarrollos unifamiliares situados en áreas periféricas.

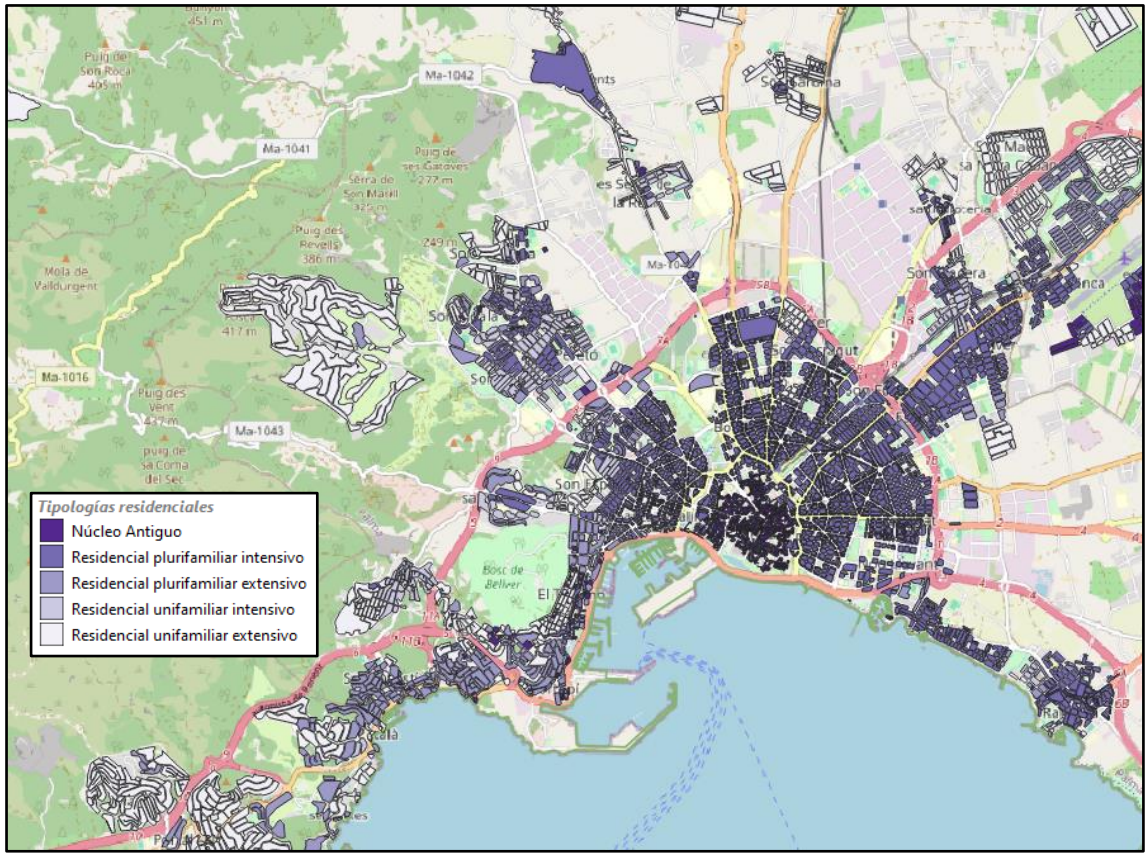


Figura 22 Distribución de las tipologías residenciales consideradas para la caracterización de la demanda de recarga compartida. Fuente: cartografía de calificaciones urbanísticas de ideIB. Elaboración propia en QGIS.

La tipología residencial se utiliza, por tanto, como soporte espacial para distribuir la presión residencial municipal y se complementa posteriormente con el indicador de déficit relativo de aparcamiento privado obtenido a partir de la información catastral.

4.7.2. Presión residencial municipal electrificada

La presión residencial municipal combina la población residente y el parque de turismos, considerando que ambas variables representan dimensiones complementarias de la movilidad cotidiana. Ambas se obtuvieron de los Datos Municipales Generales de la DGT correspondientes a 2025 (DGT, 2026) y se normalizaron en una escala de 0 a 10, obteniéndose los indicadores S_POB y S_PARQ_TUR.

$$DEM_RES_MUN = 0{,}50 \cdot S_POB + 0{,}50 \cdot S_PARQ_TUR$$

Donde:

- DEM_RES_MUN: presión residencial municipal.
- S_POB: puntuación normalizada de la población residente.
- S_PARQ_TUR: puntuación normalizada del parque municipal de turismos.

La ponderación equilibrada evita que el indicador dependa exclusivamente de la población o del número de vehículos registrados. De este modo, se representa tanto la concentración de residentes como la magnitud de la movilidad privada asociada a cada municipio.

Como indicador complementario de diagnóstico, se calculó la tasa de motorización municipal, expresada como el número de turismos por cada 1.000 habitantes. Esta representación permite observar las diferencias relativas en la presencia del vehículo privado entre municipios, aunque no se incorpora como una variable independiente en la puntuación del Modelo Pi.

En la siguiente figura, los tonos más intensos representan una mayor tasa de motorización municipal. Esta representación se utiliza como elemento complementario de diagnóstico y no interviene directamente como variable independiente en la ponderación del Modelo Pi.

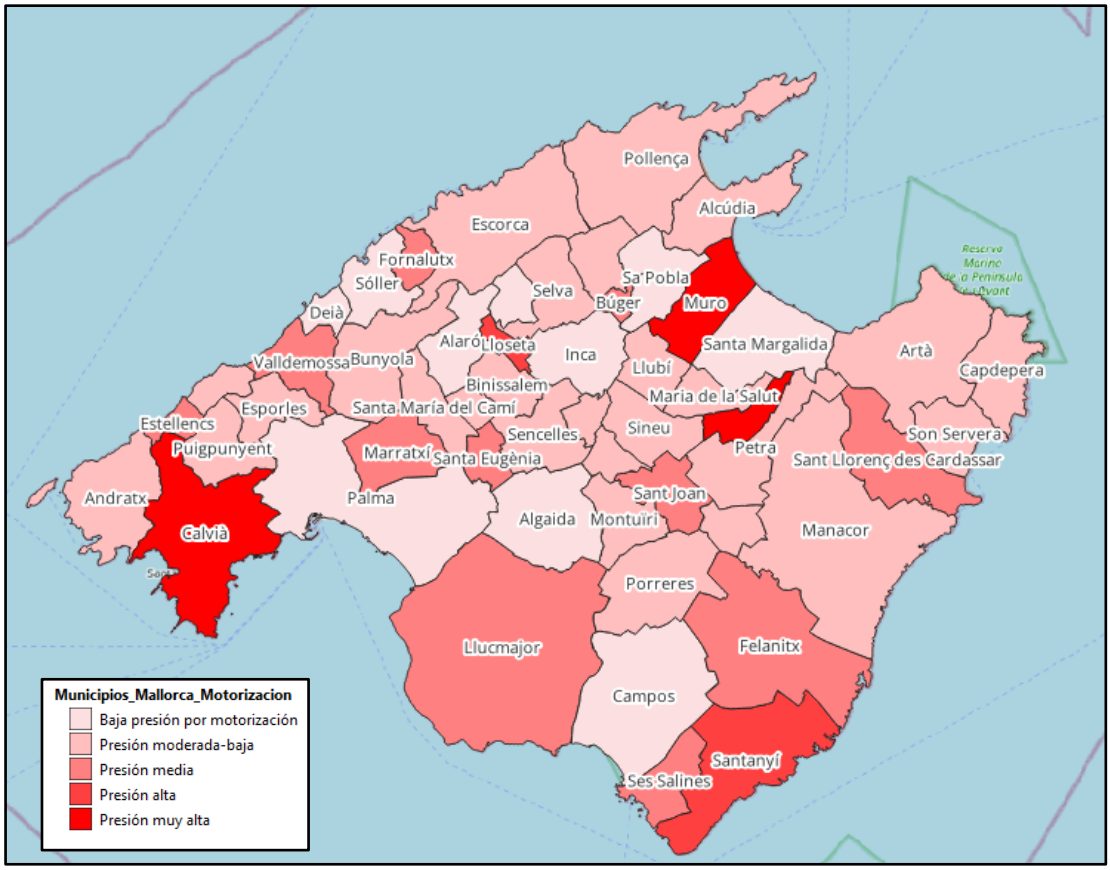


Figura 23 Tasa de motorización municipal en Mallorca. Clasificación de los municipios según el número de turismos por cada 1.000 habitantes. Fuente: Datos municipales – información general 2025 (DGT, 2026). Elaboración propia en QGIS.

A continuación, se incorpora la estimación del parque con distintivo CERO para obtener la presión residencial electrificada:

$$DEM_RES_EV = 0{,}70 \cdot DEM_RES_MUN + 0{,}30 \cdot S_TUR_0$$

Donde:

- DEM_RES_EV: presión residencial electrificada municipal.
- DEM_RES_MUN: presión residencial municipal.
- S_TUR_0: puntuación normalizada de la estimación municipal de turismos con distintivo CERO.

En esta combinación se asigna un mayor peso a la presión estructural, formada por la población y el parque de turismos, mientras que el parque estimado con distintivo CERO actúa como indicador complementario del grado de electrificación ya materializado. Las ponderaciones empleadas responden a una configuración inicial del modelo: se asigna el mismo peso a la población y al parque de turismos dentro de la presión estructural, mientras que en la presión electrificada se otorga un peso predominante a dicha estructura municipal.

Los valores obtenidos se expresan en una escala relativa de 0 a 10. Por tanto, DEM_RES_EV no representa un número de vehículos eléctricos, sesiones de carga o energía demandada, sino una

puntuación comparativa que permite identificar los municipios con mayor presión potencial de recarga residencial.

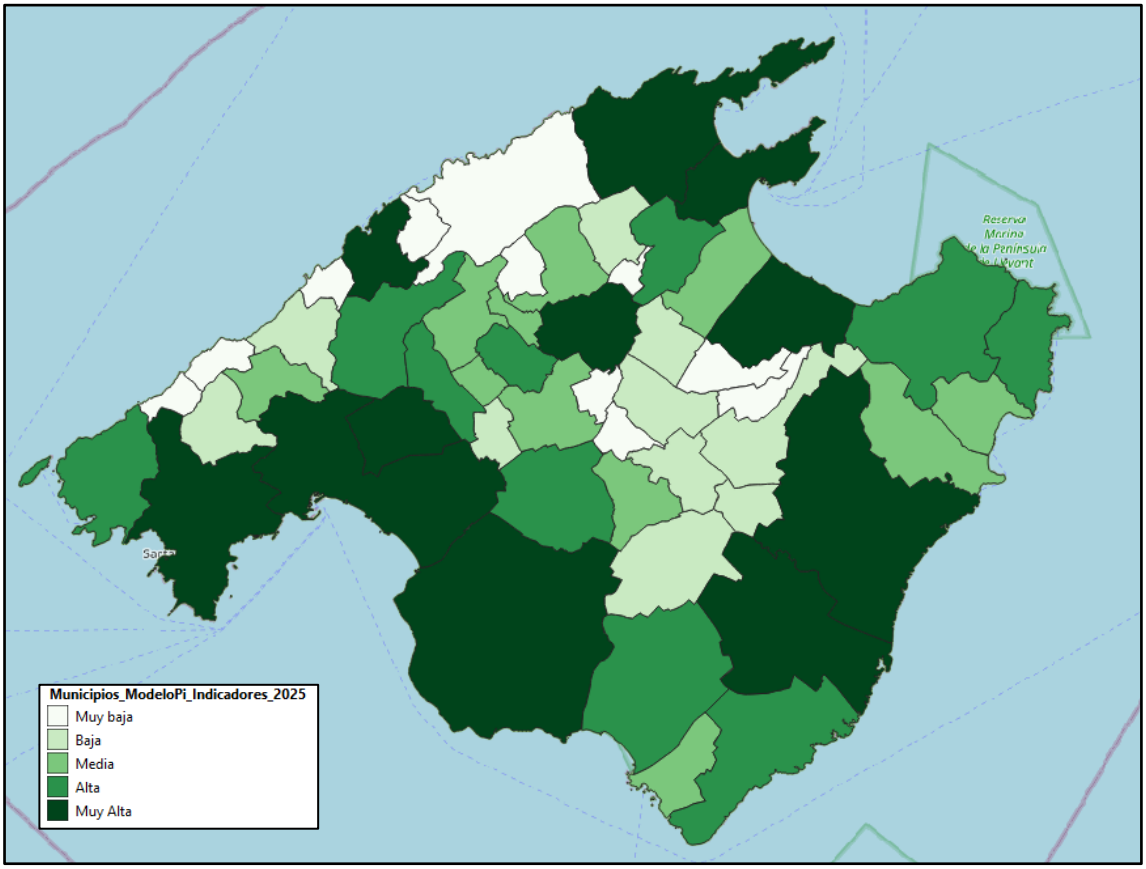


Figura 24 Distribución municipal de la presión residencial electrificada en Mallorca. Fuente: Datos municipales – información general 2025 (DGT, 2026). Elaboración propia en QGIS.

La distribución obtenida constituye el componente municipal de la demanda residencial del Modelo Pi. No obstante, una puntuación municipal elevada no implica que todo su territorio presente la misma necesidad de recarga. En las fases posteriores, este valor se combina con la puntuación asociada a la tipología residencial (S_TIP_RES) y con la necesidad potencial derivada del déficit relativo de aparcamiento privado (NEC_AC), con el objetivo de localizar dentro de cada municipio los tejidos urbanos con una mayor necesidad potencial de recarga compartida.

4.7.3. Déficit relativo de aparcamiento privado

La posibilidad de disponer de una plaza de aparcamiento privada condiciona directamente la instalación de puntos de recarga vinculados a la vivienda. En los ámbitos donde existe una mayor disponibilidad de garajes, parte de la demanda puede cubrirse mediante instalaciones privadas. Por el contrario, las zonas con menor disponibilidad relativa de aparcamiento presentan una mayor predisposición potencial a requerir soluciones de recarga compartida o de acceso público. Debido a que no existe un inventario territorial completo del número de plazas privadas asociadas a cada vivienda, se construyó un indicador aproximado a partir de la información

alfanumérica de la Dirección General del Catastro (s. f.). Para ello, se utilizaron los archivos incluidos en la *Descarga de información alfanumérica por provincia*, en formato CAT, correspondientes a las Illes Balears.

Los archivos CAT contienen información estructurada mediante registros de posición fija, por lo que no pueden incorporarse directamente como una capa cartográfica convencional. Por este motivo, se desarrolló un procedimiento mediante Python para leer y procesar los registros, identificar las referencias catastrales y agregar la información por parcela.

El tratamiento permitió obtener, entre otros, los siguientes campos:

- n_inmuebles_vivienda: número de inmuebles residenciales identificados en la parcela.
- sup_aparcamiento_m2: superficie catastral total destinada a aparcamiento.
- n_destino_AAP: número de registros asociados al destino catastral de aparcamiento.
- ratio_sup_aparc_por_vivienda_m2: superficie de aparcamiento registrada por inmueble residencial.

El indicador principal se calcula mediante la relación entre la superficie catastral destinada a aparcamiento y el número de inmuebles residenciales presentes en cada parcela:

$$RATIO_APARC = \frac{Superficie\ catastral\ destinada\ a\ aparcamiento}{Número\ de\ inmuebles\ residenciales}$$

El resultado expresa la superficie de aparcamiento registrada por vivienda. Una relación elevada indica una menor limitación relativa para disponer de recarga vinculada, mientras que una relación reducida señala una mayor necesidad potencial de soluciones de recarga compartida.

Los resultados obtenidos mediante Python se vincularon posteriormente en QGIS con la cartografía catastral de parcelas. A partir de esta unión se construyó el indicador de déficit relativo de aparcamiento privado (NEC_AC), clasificado según los siguientes intervalos:

Superficie de aparcamiento por vivienda	Clasificación	NEC_AC
Más de 50 m²/vivienda	Baja limitación o parcela singular	1
Más de 30 y hasta 50 m²/vivienda	Déficit de aparcamiento bajo	3
Más de 15 y hasta 30 m²/vivienda	Déficit de aparcamiento medio	5
Más de 5 y hasta 15 m²/vivienda	Déficit de aparcamiento alto	7
Más de 0 y hasta 5 m²/vivienda	Déficit de aparcamiento muy alto	9
Sin superficie de aparcamiento registrada	Sin aparcamiento catastral detectado	10

Tabla 9 Clasificación del déficit relativo de aparcamiento privado y asignación de la puntuación de necesidad de recarga compartida. Fuente: Dirección General del Catastro, Descarga de información alfanumérica por provincia en formato CAT. Elaboración propia.

Las parcelas con valores superiores a 50 m² de aparcamiento por vivienda se clasifican como ámbitos de baja limitación o parcelas singulares. Esta denominación se utiliza porque una superficie especialmente elevada puede corresponder a garajes colectivos, aparcamientos vinculados a otros usos o configuraciones particulares de la parcela.

La categoría sin aparcamiento catastral detectado se mantiene diferenciada del déficit muy alto. En el primer caso, no se identificó superficie registrada con destino de aparcamiento, mientras que en el segundo sí existe superficie, pero su relación con el número de viviendas es muy reducida. La ausencia de superficie catastral no permite afirmar de forma definitiva que las viviendas carezcan completamente de estacionamiento privado, aunque sí representa una mayor predisposición potencial a depender de infraestructura de recarga compartida.

A continuación, se muestra la distribución espacial de las categorías obtenidas en el entorno de Palma. La representación permite observar la variabilidad existente a escala parcelaria y distinguir ámbitos con diferentes grados de disponibilidad relativa de aparcamiento.

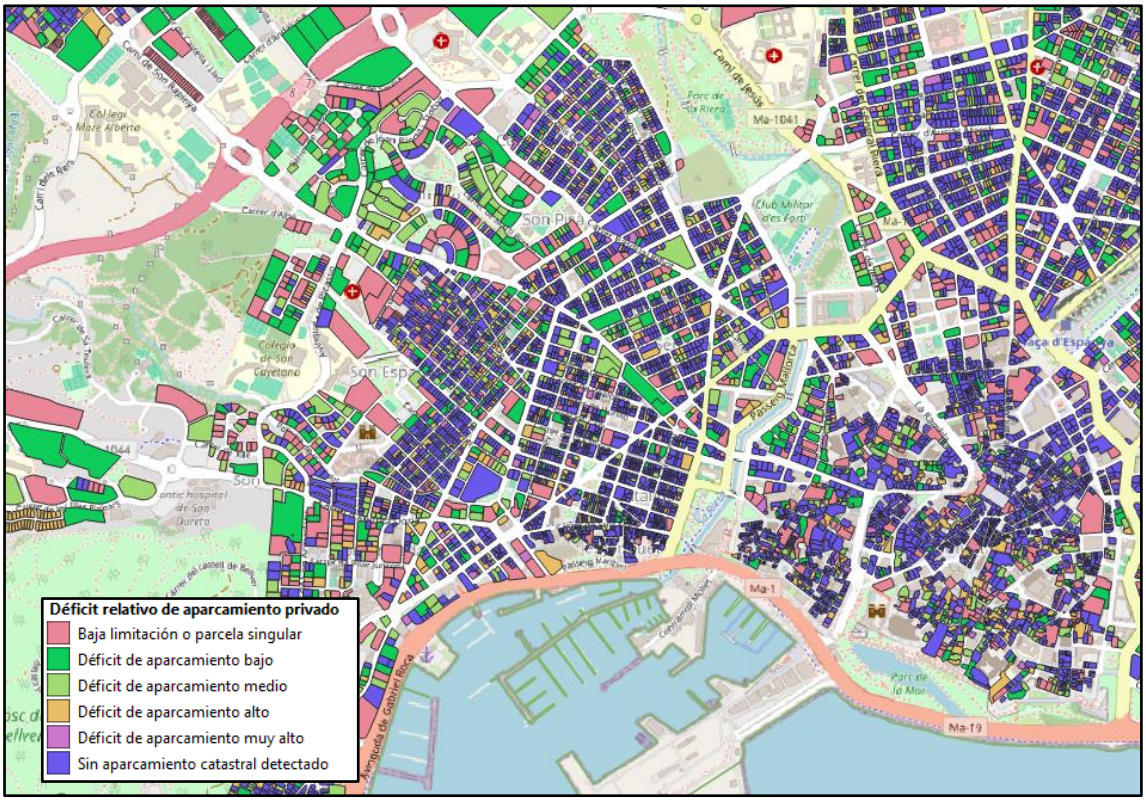


Figura 25 Clasificación del déficit relativo de aparcamiento privado en el entorno de Palma. Fuente: Dirección General del Catastro, Descarga de información alfanumérica por provincia en formato CAT. Elaboración propia mediante Python y QGIS.

El indicador debe interpretarse como una aproximación comparativa y no como un inventario exacto de plazas privadas. El campo *n_destino_AAP* identifica registros catastrales asociados al

aparcamiento, pero no equivale necesariamente al número de plazas disponibles. Del mismo modo, la superficie registrada puede incluir aparcamientos colectivos, espacios asociados a otros usos o elementos de carácter rotacional.

Dentro del Modelo Pi, *NEC_AC* se utiliza para diferenciar los ámbitos residenciales según su mayor o menor posibilidad estimada de disponer de recarga vinculada. Una puntuación elevada incrementa la necesidad potencial de recarga compartida, mientras que una puntuación reducida disminuye su valoración relativa. No obstante, este indicador no se emplea de forma aislada, sino que se combina posteriormente con la presión residencial electrificada municipal y con la tipología del tejido residencial.

4.7.4. Integración de las variables y construcción de la demanda residencial compartida

Una vez construidos los indicadores de presión residencial municipal electrificada, tipología residencial y déficit relativo de aparcamiento privado, se integraron tomando como unidad de análisis los polígonos residenciales definidos en el apartado 4.7.1. Dado que la información de aparcamiento estaba disponible a escala de parcela catastral, se trasladó a dichos polígonos mediante una media ponderada de NEC_AC según el número de inmuebles residenciales. Para ello, se calculó previamente, en cada parcela, el producto entre ambas variables:

$$NEC_POND_i = NEC_AC_i \cdot VIV_i$$

donde:

- NEC_POND es un campo auxiliar de ponderación;
- NEC_AC es la puntuación parcelaria asociada al déficit relativo de aparcamiento privado;
- VIV es el número de inmuebles residenciales identificados en la parcela.

Posteriormente, se agregaron dentro de cada polígono residencial la suma de las viviendas y la suma de los valores ponderados. A partir de estos resultados se calculó el indicador agregado NEC_AC_RES:

$$NEC_AC_RES = \frac{\sum(NEC_AC_i \cdot VIV_i)}{\sum V\,IV_i}$$

De este modo, las parcelas con un mayor número de viviendas ejercen una influencia superior sobre la puntuación del polígono residencial. Los polígonos en los que no se identificaron viviendas asociadas se mantuvieron sin puntuación, al no disponer de información suficiente para evaluar este componente.

El índice de demanda potencial de recarga residencial compartida, denominado DEM_RES_AC, se obtuvo combinando los tres componentes normalizados en una escala de 0 a 10:

$$DEM_RES_AC = \frac{DEM_RES_EV + S_TIP_RES + NEC_AC_RES}{3}$$

donde:

- DEM_RES_EV representa la presión residencial municipal electrificada;
- S_TIP_RES representa la puntuación asociada a la tipología residencial;
- NEC_AC_RES representa la necesidad asociada al déficit relativo de aparcamiento privado, ponderada por el número de viviendas.

Se adoptó una ponderación equilibrada como configuración inicial del modelo, al no disponer de una base empírica suficiente para asignar un peso predominante a alguno de los tres componentes.

Los valores obtenidos se clasificaron mediante cuantiles en cinco niveles relativos: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Las zonas clasificadas como muy altas representan los ámbitos residenciales que combinan una mayor presión municipal electrificada, una tipología urbana con mayor predisposición a depender de recarga compartida y una menor disponibilidad relativa de aparcamiento privado.

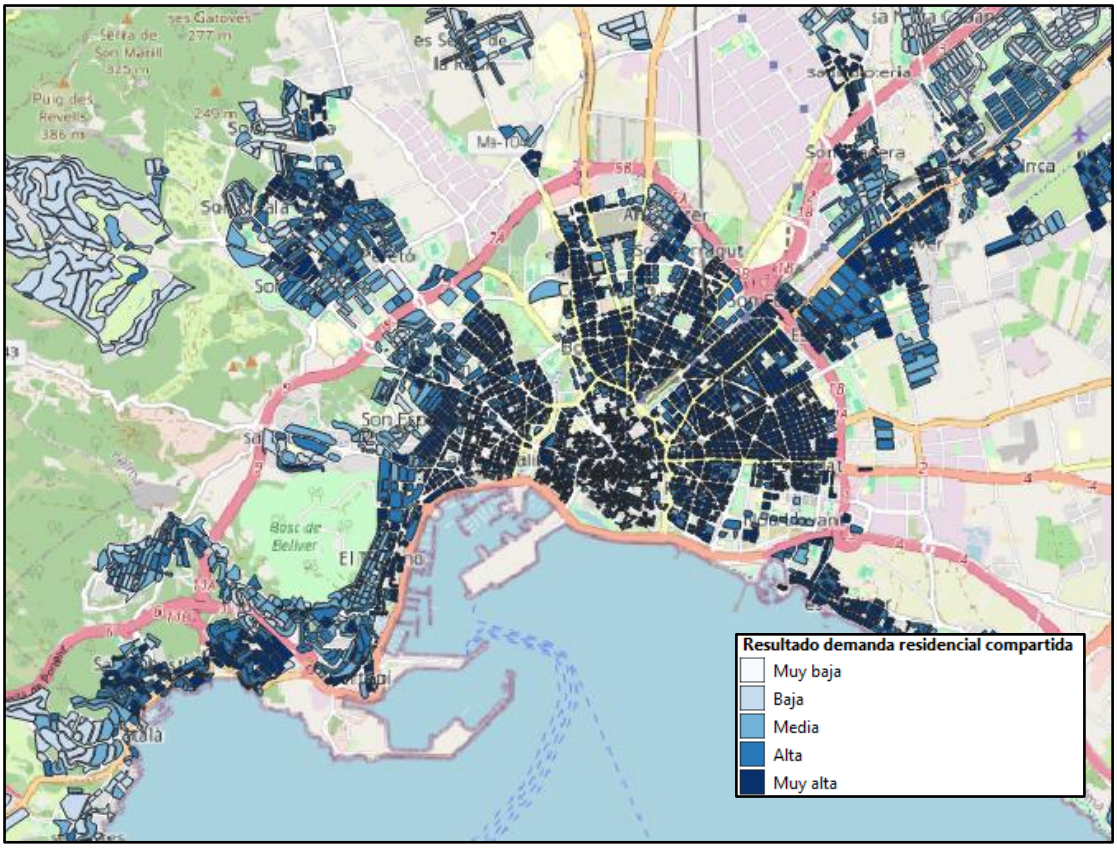


Figura 26 Demanda potencial de recarga residencial compartida en el ámbito analizado. Fuente: Datos municipales – información general 2025 (DGT, 2026), Dirección General del Catastro (s. f.) y cartografía de ideIB (ICGIB, s. f.). Elaboración propia en QGIS.

Esta primera integración permite caracterizar la distribución espacial de la demanda residencial, pero todavía no incorpora los criterios comunes de priorización definidos en el Modelo Pi. Antes

de trasladar el resultado a la malla común, se aplicó un ajuste adicional para evitar que valores elevados de déficit de aparcamiento incrementasen de forma excesiva la demanda en tejidos residenciales con menor predisposición a depender de recarga compartida. Para ello, el efecto de NEC_AC_RES se moduló mediante la puntuación de tipología residencial S_TIP_RES, siguiendo el procedimiento definido en la Metodología.

La demanda residencial ajustada se intersectó posteriormente con la malla regular de 500 × 500 m. Los fragmentos resultantes se agregaron mediante ID_CELDA, ponderando la puntuación según la superficie residencial efectivamente contenida en cada celda. Finalmente, la intensidad residencial obtenida se ajustó mediante la proporción de superficie residencial respecto a la superficie total de la unidad espacial, obteniéndose el campo DEM_RES_LOCAL_AJ. Esta variable constituye la componente de demanda utilizada posteriormente en el submodelo de priorización residencial desarrollado en el apartado 4.10.

4.8 Caracterización de la demanda de destino y oportunidad

La demanda de destino y oportunidad representa aquellos desplazamientos en los que el vehículo permanece estacionado durante la realización de otra actividad, de modo que el tiempo de estancia puede aprovecharse para efectuar la recarga. En Mallorca, esta misión adquiere especial relevancia por la concentración de actividad turística, comercial, sanitaria y de transporte, así como por la presencia estacional de población no residente.

Para caracterizar esta demanda, el Modelo Pi combina información territorial disponible a escala municipal con elementos localizados capaces de atraer desplazamientos. Por una parte, la capacidad alojativa y el turismo receptor permiten aproximar la presión turística existente en cada municipio. Por otra, los puntos de interés permiten distribuir espacialmente esta presión e identificar ámbitos donde se concentran actividades compatibles con la recarga durante la estancia.

La integración de estas variables permite obtener la demanda local de destino, representada mediante DEM_DEST_LOCAL, y un indicador complementario de oportunidad funcional, OP_DEST. Ambos se incorporan posteriormente al submodelo de priorización de destino desarrollado en el apartado 4.10.

4.8.1. Presión turística municipal

La presión turística municipal se caracterizó mediante dos variables complementarias. La primera corresponde a la capacidad alojativa reglada, obtenida a partir de las estadísticas de alojamientos turísticos publicadas por la Agencia de Estrategia Turística de las Illes Balears

(AETIB, s. f.). Esta información permite representar la capacidad estructural de acogida turística de cada municipio.

Como segunda componente se incorporó información sobre turismo receptor procedente del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2026), utilizada para aproximar las diferencias territoriales en la presencia de visitantes. A diferencia de la capacidad alojativa, que representa la oferta registrada, esta variable permite introducir una referencia asociada a la intensidad efectiva de la actividad turística.

Ambas variables se normalizaron siguiendo el procedimiento definido en el capítulo de Metodología y se combinaron para obtener un indicador municipal de presión turística y de destino. La puntuación resultante se interpreta de forma relativa dentro del ámbito de Mallorca y no como una estimación directa del número de vehículos, sesiones de recarga o energía demandada.

4.8.2. Puntos de interés asociados a la demanda de destino

La presión turística municipal no permite identificar por sí sola en qué puntos del territorio se concentran los desplazamientos. Por este motivo, se incorporaron puntos de interés obtenidos de OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, s. f.) mediante el complemento QuickOSM de QGIS.

Se consideraron actividades y equipamientos asociados a estancias compatibles con la recarga, entre ellos alojamientos turísticos, equipamientos sanitarios, áreas comerciales, aparcamientos, restauración y nodos de transporte. Estos elementos permiten reconocer concentraciones de actividad capaces de generar desplazamientos y permanencias temporales.

La información localizada se utilizó para introducir la componente espacial de la demanda de destino, identificando las unidades espaciales en las que se concentran actividades y equipamientos capaces de generar desplazamientos y permanencias temporales. Los puntos de interés correspondientes específicamente a aparcamientos y estaciones de servicio se emplearon posteriormente para construir el indicador complementario de oportunidad funcional OP_DEST, desarrollado en el apartado 4.8.4.

4.8.3. Construcción de la demanda local de destino

Los puntos de interés se agregaron sobre la unidad espacial de análisis mediante la suma de los pesos asignados a los elementos presentes en cada celda (PESO_DEST_sum). Debido a la distribución asimétrica de esta variable, el resultado se transformó mediante la normalización logarítmica definida en la Metodología, obteniéndose el indicador S_POI_DEST en una escala de 0 a 10.

Posteriormente, se incorporó a cada celda la demanda turística municipal (DEM_DEST_MUN), construida a partir de la capacidad alojativa y el turismo receptor y representada en la capa de trabajo mediante el campo MUN_DEM_DEST_MUN.

Esta formulación mantiene la concentración espacial de actividades y equipamientos como componente estructurante de la demanda local, mientras que la presión turística municipal ajusta su intensidad. El resultado se almacena en el campo DEM_DEST_LOCAL y constituye la componente de demanda utilizada posteriormente en el cálculo de la prioridad de destino.

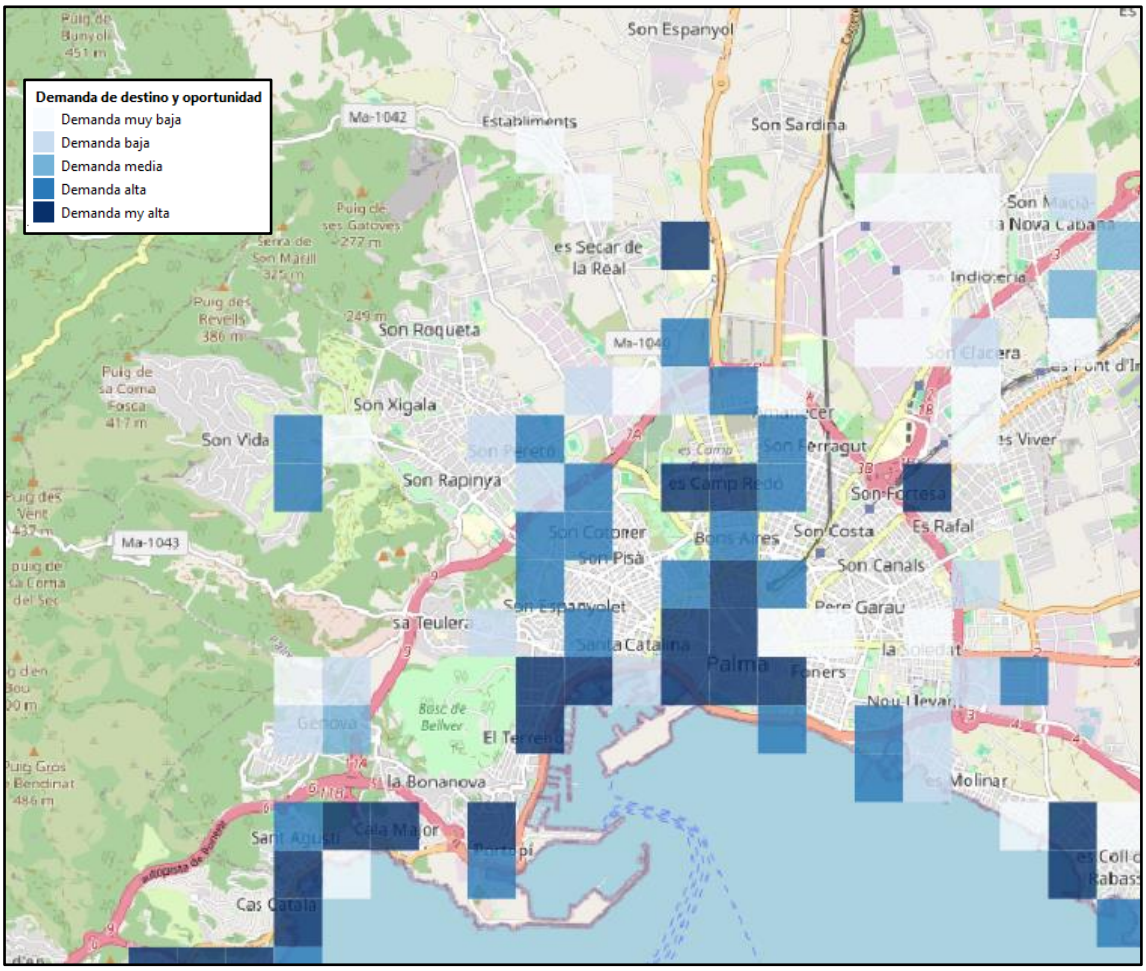


Figura 27 Demanda local de destino y oportunidad en Palma y su entorno. Fuente: AETIB (s. f.), INE (2026) y OpenStreetMap contributors (s. f.). Elaboración propia en QGIS.

4.8.4. Oportunidad funcional de destino

De forma complementaria a la demanda local, se incorporó un indicador de oportunidad funcional destinado a identificar aquellas unidades espaciales que presentan instalaciones especialmente compatibles con la recarga durante la estancia. Para ello, se consideró la presencia de aparcamientos y estaciones de servicio dentro de la malla de análisis, generándose los indicadores S_PARK_DEST y S_GAS_DEST.

Los aparcamientos se consideran especialmente relevantes dentro de esta misión de recarga, ya que representan espacios en los que el vehículo permanece estacionado durante un periodo compatible con la realización de una sesión de carga. Las estaciones de servicio se incorporan como elemento complementario debido a su vinculación funcional con la movilidad y a su potencial para albergar infraestructura de recarga, aunque con un peso inferior al de los aparcamientos dentro de esta misión.

A partir de ambos indicadores se obtiene OP_DEST, siguiendo la ponderación definida en el apartado 3.7.3 de la Metodología. El resultado se expresa en una escala de 0 a 10 y representa una condición de oportunidad funcional, no una demanda independiente.

Por este motivo, la presencia de aparcamientos o estaciones de servicio no genera por sí sola una zona prioritaria. OP_DEST se utiliza posteriormente como factor de ajuste dentro del submodelo de destino y oportunidad, incrementando la puntuación de aquellas celdas en las que previamente se ha identificado una demanda local mediante DEM_DEST_LOCAL.

En conjunto, la caracterización realizada permite trasladar a la malla común del Modelo Pi tanto la demanda asociada a los destinos, representada mediante DEM_DEST_LOCAL, como la oportunidad funcional vinculada a determinados emplazamientos, recogida mediante OP_DEST. Ambas variables permiten caracterizar la misión de recarga asociada a la permanencia del vehículo en el lugar de destino. A continuación, el análisis se desplaza hacia una lógica diferente, vinculada a los desplazamientos entre municipios y a la identificación de los principales ejes de movilidad de Mallorca, mediante la caracterización de la demanda asociada a corredores interurbanos.

4.9 Caracterización de la demanda asociada a corredores interurbanos

La demanda asociada a corredores interurbanos responde a una lógica distinta de la recarga residencial o de destino. En este caso, el interés se concentra en los desplazamientos entre municipios y en los principales ejes viarios utilizados para conectar los diferentes núcleos de Mallorca, donde la necesidad de recarga está vinculada principalmente a la movilidad en ruta.

Para representar esta componente, el Modelo Pi utiliza las principales relaciones origen-destino de residentes y turistas como indicador de la intensidad relativa de los desplazamientos intermunicipales. Estas relaciones se agrupan posteriormente en corredores viarios comunes, evitando tratar de forma independiente aquellos pares de municipios cuyos desplazamientos comparten una parte significativa del recorrido.

A partir de esta información se construye una variable espacial de demanda en ruta, DEM_RUTA, que permite trasladar la intensidad relativa de los principales corredores a la malla común del modelo. Esta variable no representa un número directo de vehículos, sesiones de recarga o

energía demandada, sino una medida comparativa de la presión de movilidad interurbana utilizada posteriormente en el submodelo de priorización de corredores.

4.9.1. Análisis de las dinámicas de movilidad y flujos origen-destino

Los datos utilizados proceden del *Estudio de la capacidad de carga de la Red Viaria del Consell de Mallorca* (Consell de Mallorca, 2024) y representan movimientos estimados entre municipios a partir de información de dispositivos móviles. Se expresan como viajes medios diarios en ambos sentidos y, por tanto, no deben interpretarse directamente como número de vehículos ni como demanda eléctrica, sino como un indicador de intensidad relativa de movilidad utilizado para identificar los principales corredores de desplazamiento de la isla.

El análisis se realizó inicialmente de forma separada para residentes y turistas y posteriormente se integró para construir los corredores utilizados en el submodelo de recarga interurbana.

4.9.2. Movilidad Residente (Movilidad Pendular)

La movilidad residente presenta una fuerte concentración de desplazamientos en torno al área metropolitana de Palma y a los principales ejes que conectan la capital con Marratxí, Calvià, Llucmajor e Inca. Según el *Estudi de Càrrega del Consell de Mallorca* (2024), las relaciones Palma–Marratxí, Palma–Calvià y Palma–Llucmajor se encuentran entre los flujos intermunicipales de mayor intensidad durante la semana analizada.

A continuación, se muestran las principales relaciones origen-destino de residentes, expresadas como viajes medios diarios en ambos sentidos:

Municipio 1	Municipio 2	Viajes generados
Palma	Marratxí	131.887
Palma	Calvià	101.798
Palma	Llucmajor	75.009
Manacor	Sant Llorenç	28.055
Sant Llorenç	Son Servera	19.423
Palma	Bunyola	18.894
Palma	Inca	18.197
Alcúdia	Pollença	16.464
Santanyí	Felanitx	15.467
Manacor	Felanitx	15.343

Tabla 10 Principales relaciones de movilidad residente intermunicipal en Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024). Elaboración propia.

De forma complementaria, el estudio identifica a Palma como el principal municipio generador y receptor de movilidad residente, seguido por Marratxí, Calvià, Llucmajor, Manacor e Inca. La consideración relativa respecto a la población también permite identificar municipios de menor tamaño con una elevada intensidad de

desplazamientos. Estos indicadores se utilizan como elementos de diagnóstico territorial, mientras que la construcción del submodelo de ruta se apoya directamente en las relaciones origen-destino entre municipios.

4.9.3. Movilidad Turística Intermunicipal

El patrón turístico presenta una distribución territorial diferente a la movilidad residente, con una mayor presencia de relaciones asociadas a los municipios costeros y a los principales destinos turísticos. Destacan especialmente los flujos Palma–Calvià y Palma–Llucmajor, junto con relaciones como Santanyí–Felanitx, Alcúdia–Pollença, Calvià–Andratx y Alcúdia–Muro.

A continuación, se muestran las principales relaciones origen-destino correspondientes a población turística durante la semana analizada:

Municipio 1	Municipio 2	Viajes generados
Palma	Calvià	27.085
Palma	Llucmajor	18.543
Santanyí	Felanitx	8.340
Alcúdia	Pollença	7.267
Son Servera	Sant Llorenç	6.409
Calvià	Andratx	6.371
Alcúdia	Muro	5.879
Manacor	Sant Llorenç	5.678
Palma	Santanyí	5.459
Palma	Alcúdia	4.901

Tabla 11 Principales relaciones de movilidad turística intermunicipal en Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024). Elaboración propia.

A escala municipal, Palma concentra el mayor volumen de viajes turísticos con origen o destino en el municipio, seguida por Calvià, Santanyí, Alcúdia, Llucmajor y Manacor. Esta distribución muestra la influencia de los principales ámbitos turísticos de la isla y complementa la información obtenida de las relaciones origen-destino.

4.9.4. Construcción de los corredores interurbanos del Modelo Pi

A partir de las principales relaciones origen-destino de residentes y turistas se definieron los corredores interurbanos utilizados por el Modelo Pi. La selección agrupó relaciones compatibles con un mismo eje viario, evitando tratar cada par municipal como una ruta independiente cuando los desplazamientos comparten gran parte de su recorrido.

La definición de los itinerarios se realizó sobre la red viaria de Mallorca obtenida de ideIB (ICGIB, s. f.), mediante un ajuste cartográfico supervisado basado en la continuidad funcional de cada recorrido. Como resultado se obtuvieron ocho corredores principales:

ID	Corredor	Viajes residentes	Viajes turistas	Viajes totales
C01	Palma–Marratxí–Inca–Alcúdia	150.084	4.901	**154.985**
C02	Palma–Calvià–Andratx	101.798	33.456	**135.254**
C03	Palma–Llucmajor–Santanyí	75.009	24.002	**99.011**
C04	Palma–Bunyola	18.894	0	**18.894**
C05	Alcúdia–Pollença	16.464	7.267	**23.731**
C06	Alcúdia–Muro	0	5.879	**5.879**
C07	Manacor–Sant Llorenç–Son Servera	47.478	12.087	**59.565**
C08	Santanyí–Felanitx–Manacor	30.810	8.340	**39.150**

Tabla 12 Corredores interurbanos definidos a partir de las principales relaciones origen-destino de residentes y turistas. Fuente: Consell de Mallorca (2024). Elaboración propia.

Los viajes totales de cada corredor se normalizaron en una escala de 0 a 10 siguiendo el procedimiento definido en la Metodología, obteniéndose el indicador S_OD_CORR. El corredor Palma–Marratxí–Inca–Alcúdia, al presentar el mayor volumen agregado, adopta el valor máximo de referencia.

- C01 = 10,000
- C02 = 8,727
- C03 = 6,388
- C04 = 1,219
- C05 = 1,531
- C06 = 0,379
- C07 = 3,843
- C08 = 2,526

Este indicador constituye la medida de intensidad relativa utilizada posteriormente para trasladar la presión de movilidad interurbana a la malla del Modelo Pi.

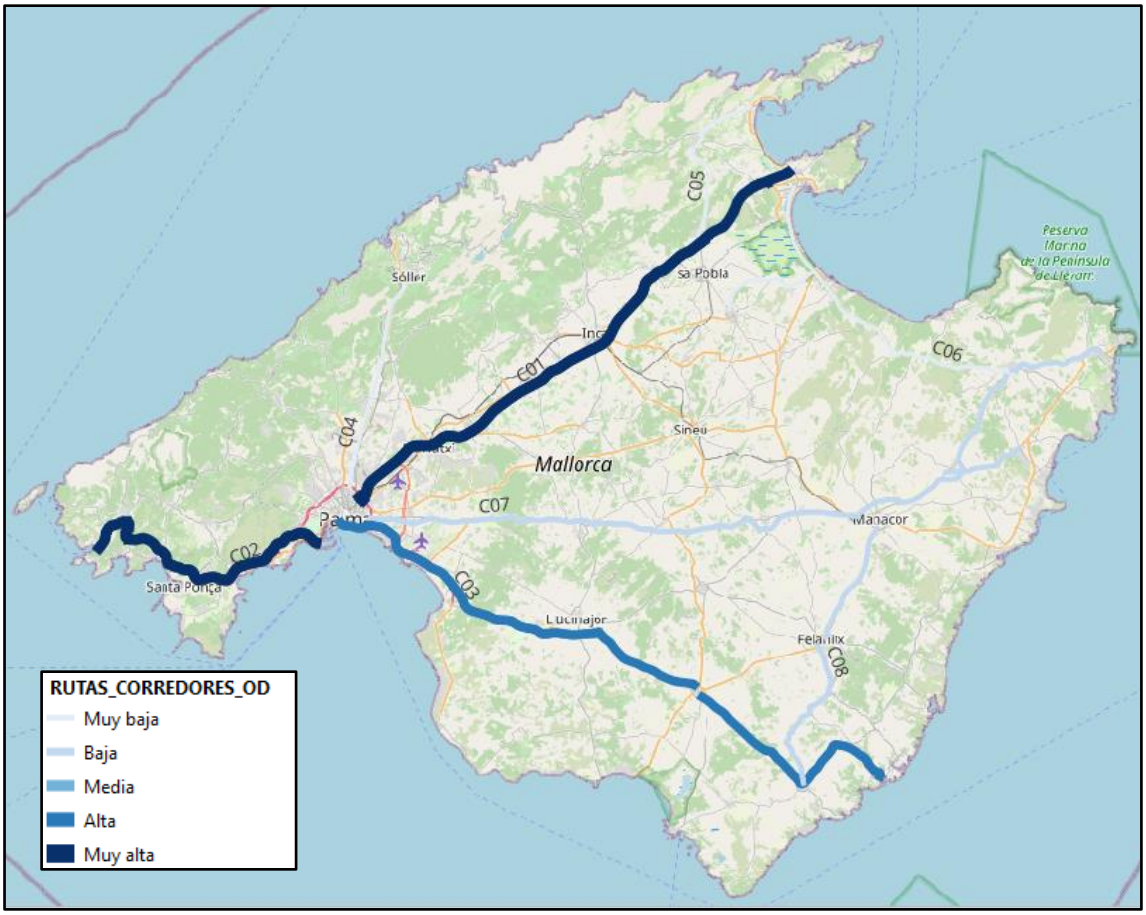


Figura 28 Distribución de los corredores interurbanos definidos a partir de los principales flujos origen-destino de residentes y turistas en Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024) e ideIB (ICGIB, s. f.). Elaboración propia en QGIS.

4.9.4.1. Traslado de los corredores a la malla de análisis

Para trasladar la movilidad interurbana a la malla del Modelo Pi, se generó en QGIS una zona de influencia de 250 m alrededor de cada uno de los ocho corredores definidos. Posteriormente, estas zonas se cruzaron con la malla regular de 500 × 500 m.

Cuando una celda quedaba afectada por más de un corredor, se conservó la mayor puntuación de S_OD_CORR, evitando sumar valores por superposición. El resultado de esta operación quedó recogido inicialmente en el campo S_OD_CORR_max. A partir de este valor se construyó DEM_RUTA, manteniendo la puntuación máxima asociada al corredor y asignando un valor igual a 0 a las celdas no afectadas por ninguno de los corredores.

De forma complementaria, se revisó la intensidad media diaria de tráfico (IMD) publicada por el Consell de Mallorca (2025) para la red viaria de la isla. Esta información se utilizó únicamente como referencia para contrastar la coherencia general de los corredores seleccionados y no como variable cuantitativa del modelo.

De este modo, las relaciones origen-destino de residentes y turistas se transforman en una variable espacial aplicable a la malla, representada mediante DEM_RUTA, que constituye la componente de demanda del submodelo de recarga interurbana.

4.9.5. Variables funcionales complementarias del submodelo

Además de la demanda asociada a los corredores, se prepararon dos variables complementarias utilizadas posteriormente en el cálculo de la prioridad: la presencia de estaciones de servicio (S_GAS_RUTA) y el carácter interurbano de la unidad espacial (S_INTERURB).

Para S_GAS_RUTA, las estaciones de servicio se relacionaron espacialmente con la malla de análisis y se contabilizó su presencia en cada celda. A partir del campo de conteo obtenido (fid_count) se aplicó un criterio binario, asignando S_GAS_RUTA = 10 cuando la celda contiene al menos una estación de servicio y S_GAS_RUTA = 0 cuando no se registra ninguna.

Para diferenciar las zonas urbanas de los ámbitos con una función más claramente interurbana, se utilizó la delimitación de núcleos urbanos y se generó en QGIS un buffer de 500 m alrededor de los mismos. A partir de esta referencia se construyó S_INTERURB, asignando un valor de 0 a las celdas localizadas dentro de los núcleos urbanos, 5 a las situadas fuera del núcleo, pero dentro de su área de influencia de 500 m y 10 a las situadas fuera de dicha área de influencia.

Estas variables no constituyen una demanda independiente. Se incorporan posteriormente como factores de ajuste dentro del submodelo de corredores interurbanos desarrollado en el apartado 4.10.

4.10 Aplicación integrada del Modelo Pi al caso de Mallorca

Los apartados anteriores han permitido construir las variables territoriales, eléctricas, de movilidad y de cobertura necesarias para la aplicación del Modelo Pi en Mallorca. En esta fase, dichas variables se integran sobre la malla común de 500 × 500 m siguiendo el procedimiento definido en el capítulo de Metodología.

El modelo no genera una única localización óptima ni un clasificación conjunta para toda la infraestructura de recarga. La aplicación produce tres salidas independientes, correspondientes a las misiones de recarga residencial compartida, destino y oportunidad, y corredores interurbanos. De este modo, una misma zona puede presentar diferente prioridad dependiendo de la necesidad de recarga analizada.

En los tres submodelos, la viabilidad territorial actúa como condición previa mediante el campo VIAB_CELDA. Sobre las celdas compatibles se combinan posteriormente los indicadores específicos de demanda, cobertura de la infraestructura existente, oportunidad eléctrica y, cuando corresponde, variables funcionales propias de cada misión.

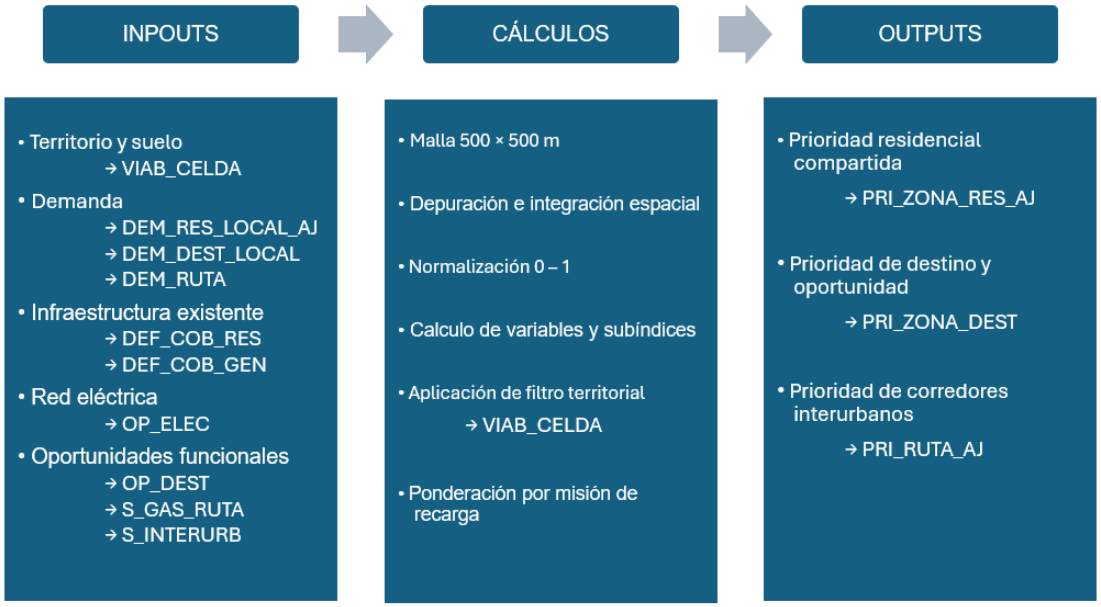


Figura 29 Esquema de aplicación del Modelo Pi al caso de Mallorca: entradas, proceso de cálculo y salidas. Fuente: elaboración propia.

4.10.1. Integración de las variables sobre la malla común

Todas las variables utilizadas en la aplicación se trasladaron a la malla regular de 500 × 500 m definida previamente. Esta unidad espacial permite combinar fuentes originalmente expresadas como puntos, líneas, parcelas o polígonos municipales manteniendo una referencia común mediante ID_CELDA.

La condición VIAB_CELDA se aplica como filtro territorial común. Las celdas clasificadas como no viables reciben prioridad final igual a cero, mientras que las restantes son evaluadas según las variables específicas de cada misión de recarga.

A diferencia del filtro territorial, los indicadores de cobertura y oportunidad eléctrica se incorporan como criterios ponderados. Por tanto, una capacidad eléctrica publicada reducida o una mayor cobertura previa disminuyen la prioridad relativa, pero no constituyen por sí mismas criterios automáticos de exclusión.

4.10.2. Recarga residencial compartida

El submodelo de recarga residencial compartida utiliza como componente de demanda la variable DEM_RES_LOCAL_AJ, obtenida mediante el proceso desarrollado en el apartado 4.7. A esta demanda se incorporan el déficit de cobertura específico para la misión residencial (DEF_COB_RES) y la oportunidad eléctrica preliminar (OP_ELEC).

Para las celdas clasificadas como territorialmente viables y con demanda residencial superior a cero, la prioridad se calcula mediante:

$$PRI_ZONA_RES_AJ = DEM_RES_LOCAL_AJ \left(0{,}50 + 0{,}30\ \frac{DEF_COB_RES}{10} + 0{,}20 \frac{OP_ELEC}{10}\right)$$

La demanda residencial constituye la base de la puntuación. El déficit de cobertura puede incrementar la prioridad hasta un 30 %, mientras que la oportunidad eléctrica puede hacerlo hasta un 20 %. De este modo, ambos indicadores modifican una necesidad residencial previamente identificada, pero no generan por sí solos una zona prioritaria.

La expresión se aplica únicamente cuando VIAB_CELDA = 1 y existe demanda residencial local. Las celdas clasificadas como no viables o sin demanda asociada reciben prioridad final igual a cero.

El resultado se almacena en el campo PRI_ZONA_RES_AJ, que constituye la salida final del submodelo de recarga residencial compartida. La distribución espacial obtenida se muestra en la figura siguiente.

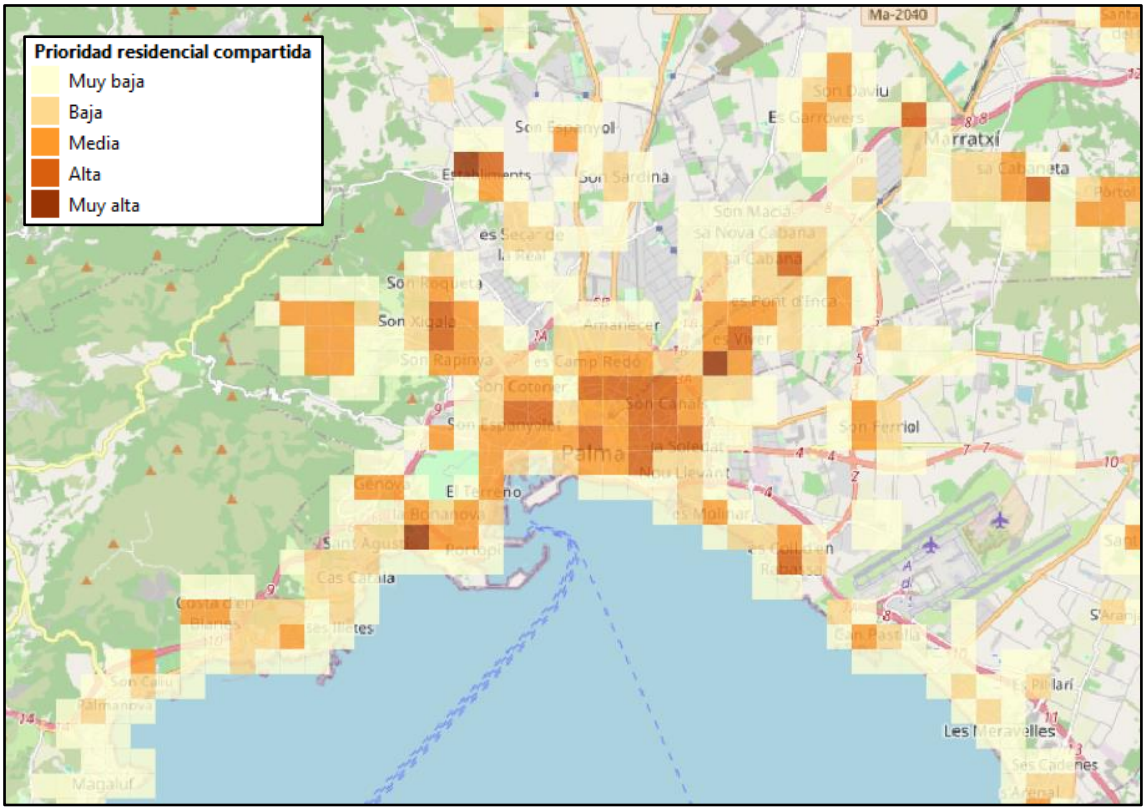


Figura 30 Prioridad final para la recarga residencial compartida en Palma y su entorno metropolitano. Fuente: DGT (2026), Catastro, ideIB, infraestructura de recarga y e-distribución. Elaboración propia en QGIS.

El resultado representa una prioridad relativa dentro de la misión residencial y no la selección de una ubicación concreta para instalar infraestructura de recarga.

4.10.3. Recarga de destino y oportunidad

El submodelo de recarga de destino y oportunidad integra sobre la malla común la demanda local previamente construida (DEM_DEST_LOCAL) con el déficit de cobertura general (DEF_COB_GEN), la oportunidad eléctrica (OP_ELEC) y la oportunidad funcional asociada a destinos (OP_DEST).

La variable OP_DEST incorpora como oportunidad funcional la presencia de aparcamientos y estaciones de servicio. Los aparcamientos reciben un mayor peso por constituir espacios especialmente compatibles con la recarga durante la estancia, mientras que las estaciones de servicio se incorporan de forma complementaria por su vinculación funcional con la movilidad. Los restantes puntos de interés considerados en esta misión intervienen previamente en la construcción de S_POI_DEST y, por tanto, en DEM_DEST_LOCAL.

Para las celdas clasificadas como territorialmente viables y con demanda de destino superior a cero, la prioridad se calcula mediante:

$$PRI_ZONA_DEST = DEM_DEST_LOCAL\left(0{,}45 + 0{,}20\frac{DEF_COB_GEN}{10} + 0{,}20\frac{OP_ELEC}{10} + 0{,}15\frac{OP_DEST}{10}\right)$$

La demanda local constituye así el componente principal de la puntuación, mientras que el déficit de cobertura, la oportunidad eléctrica y la presencia de destinos permiten ajustar la prioridad relativa de cada celda. Las celdas con VIAB_CELDA = 0 o sin demanda asociada reciben prioridad igual a cero.

El resultado se almacena en el campo PRI_ZONA_DEST y representa la prioridad espacial relativa para el refuerzo de la infraestructura de recarga de destino y oportunidad. Su interpretación no corresponde a la selección directa de un emplazamiento, sino a la identificación de zonas donde concurren condiciones favorables dentro del conjunto de variables analizadas.

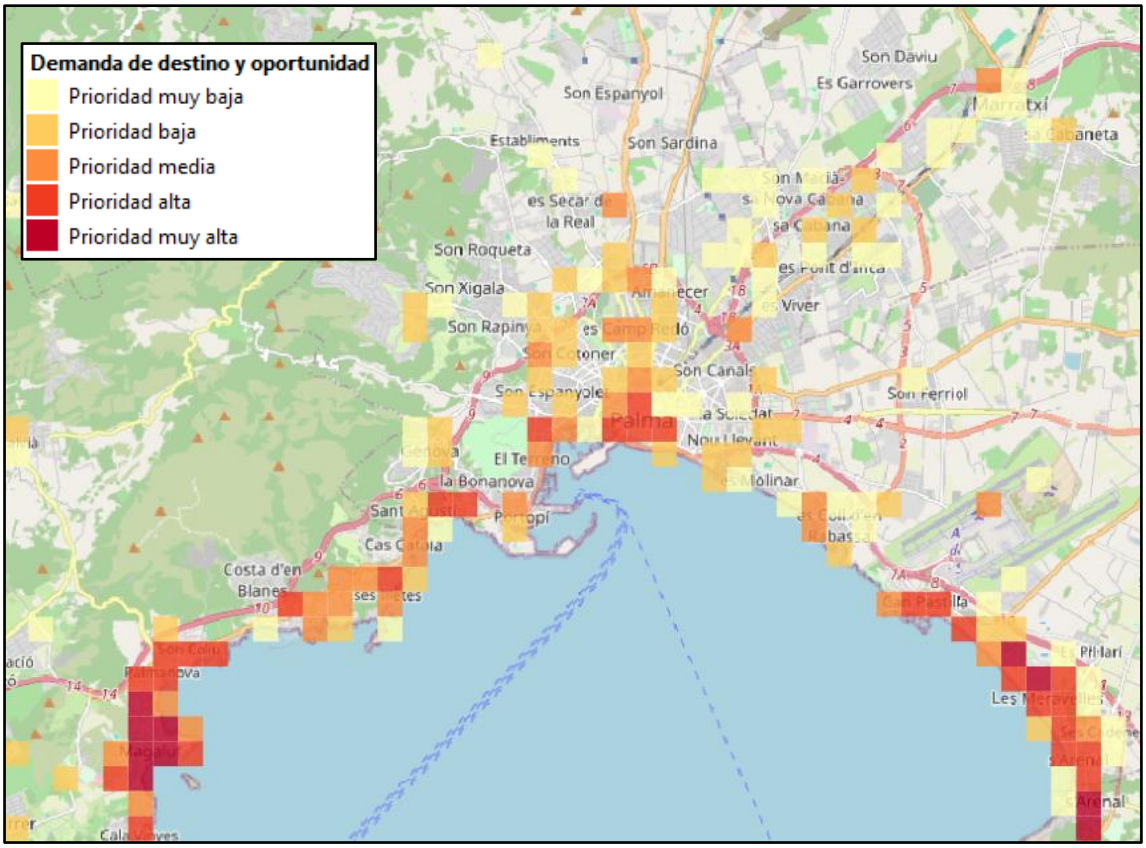


Figura 31 Prioridad final para la recarga de destino y oportunidad en Mallorca. Fuente: AETIB, INE, OpenStreetMap, e-distribución e infraestructura de recarga existente. Elaboración propia en QGIS.

4.10.4. Recarga asociada a corredores interurbanos

El submodelo de recarga asociada a corredores utiliza como componente de demanda la variable DEM_RUTA, obtenida a partir de las principales relaciones origen-destino de residentes y turistas y su traslado a la malla mediante los corredores definidos en el apartado 4.9. El análisis se complementa con el déficit de cobertura general (DEF_COB_GEN), la oportunidad eléctrica (OP_ELEC) y la presencia de estaciones de servicio próximas al corredor (S_GAS_RUTA).

Sobre las celdas territorialmente viables y con demanda interurbana, se obtiene inicialmente la prioridad asociada al corredor:

$$PRI_ZONA_RUTA = DEM_RUTA\left(0{,}45 + 0{,}20\frac{DEF_COB_GEN}{10} + 0{,}20\frac{OP_ELEC}{10} + 0{,}15\frac{S_GAS_RUTA}{10}\right)$$

La presencia de estaciones de servicio se incorpora como una oportunidad funcional por tratarse de espacios previamente vinculados a la movilidad viaria, sin que ello implique su selección automática como emplazamientos de recarga.

Para reforzar el carácter específicamente interurbano de esta misión se aplica posteriormente un ajuste según la relación de cada celda con los núcleos urbanos. Se generó para ello una zona

de influencia de 500 m alrededor de los núcleos urbanos y se definió el indicador S_INTERURB con tres niveles:

- 0 para celdas situadas dentro de núcleos urbanos;
- 5 para celdas situadas en la franja de transición hasta 500 m;
- 10 para las celdas situadas fuera de dicha zona de influencia.

La prioridad final se obtiene mediante:

$$PRI_RUTA_AJ = PRI_ZONA_RUTA \cdot \frac{S_INTERURB}{10}$$

El campo PRI_RUTA_AJ constituye la salida final del submodelo y favorece las zonas vinculadas a los principales corredores de movilidad situadas fuera de los núcleos urbanos, manteniendo una puntuación intermedia en sus áreas de transición.

La aplicación de VIAB_CELDA y del ajuste final mediante S_INTERURB puede generar discontinuidades en la representación de la prioridad asociada a los corredores. Estas interrupciones no constituyen errores cartográficos, sino que responden a la exclusión de celdas territorialmente no viables y a la reducción de la prioridad dentro de los núcleos urbanos.

El resultado representa, por tanto, una prioridad espacial relativa para la implantación de infraestructura asociada a movilidad interurbana y no una selección definitiva de ubicaciones concretas.

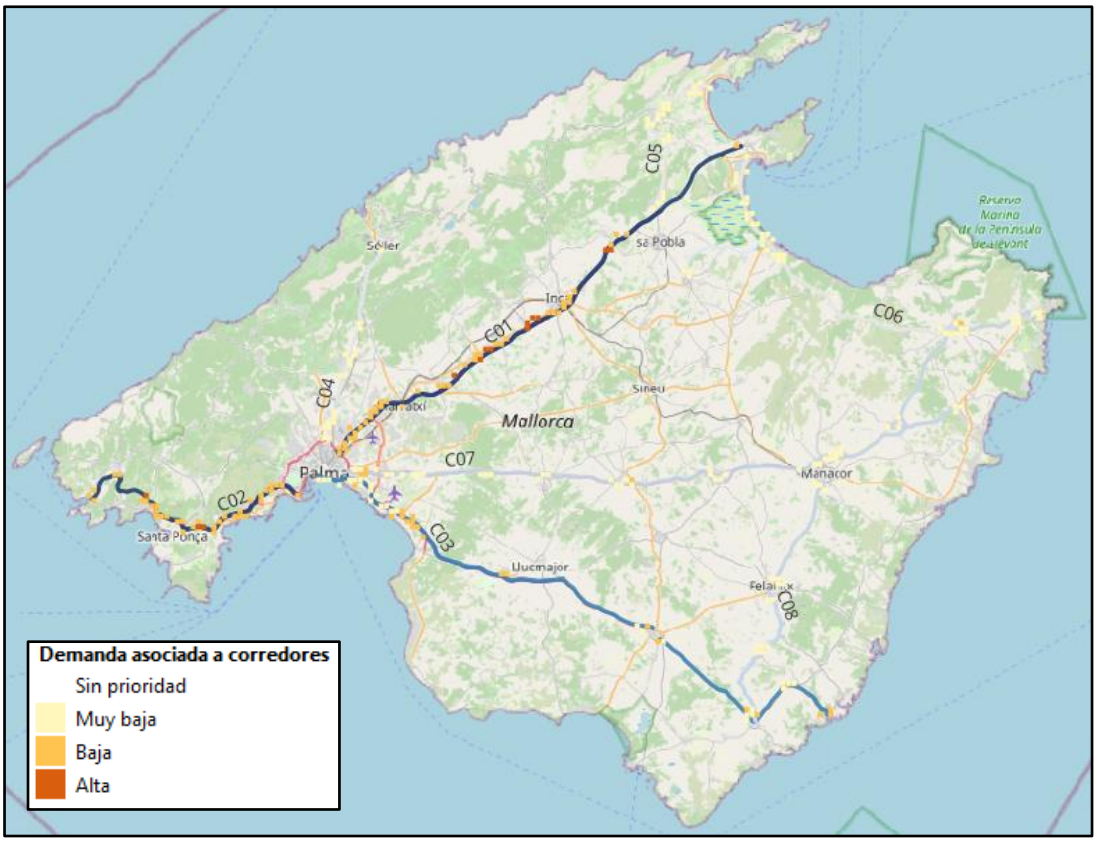


Figura 32 Prioridad final para la recarga en corredores interurbanos de Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024), e-distribución e infraestructura de recarga existente. Elaboración propia en QGIS.

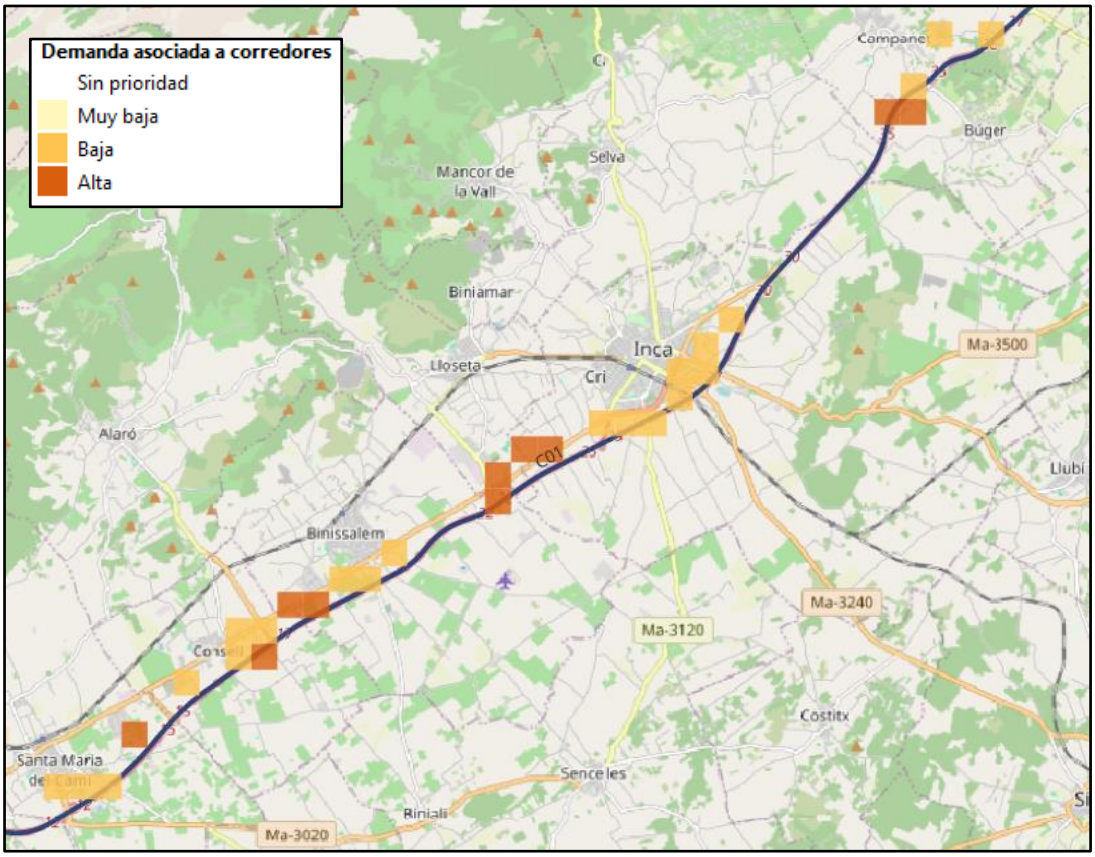


Figura 33 Detalle prioridad final para la recarga en corredores interurbanos de Mallorca. Fuente: Consell de Mallorca (2024), e-distribución e infraestructura de recarga existente. Elaboración propia en QGIS

4.11 Síntesis estratégica del caso de estudio

La aplicación del Modelo Pi en Mallorca genera tres superficies de prioridad diferenciadas según la misión de recarga analizada. La salida residencial concentra el análisis en los tejidos donde coinciden demanda potencial de recarga compartida, déficit de cobertura y oportunidad eléctrica; la salida de destino incorpora la actividad turística, los puntos de interés y otros nodos generadores de movilidad; mientras que el submodelo interurbano traslada los principales flujos origen-destino a los corredores viarios y ajusta su prioridad según las condiciones territoriales y funcionales.

Los tres resultados deben interpretarse de forma independiente y como prioridades espaciales relativas. El modelo no determina emplazamientos definitivos ni sustituye los estudios técnicos, urbanísticos o de acceso y conexión necesarios para desarrollar una instalación concreta.

La distribución territorial y las principales diferencias observadas entre las tres salidas se analizan en el capítulo de Resultados.

5. RESULTADOS

Una vez tratadas e integradas las distintas fuentes de información y obtenidas las tres salidas del Modelo Pi, se procede al análisis de los resultados generados para cada misión de recarga. Estas salidas corresponden a la recarga residencial compartida, la recarga de destino y oportunidad y la recarga asociada a corredores interurbanos.

El análisis se realiza de forma independiente para cada submodelo, ya que cada uno responde a necesidades de movilidad y criterios territoriales diferentes. Posteriormente, se comparan sus patrones espaciales con el objetivo de identificar las principales diferencias y coincidencias entre las zonas de mayor prioridad relativa.

5.1 Presentación general de los resultados

La aplicación del Modelo Pi sobre la malla de 500 × 500 m genera tres resultados independientes, correspondientes a la recarga residencial compartida, la recarga de destino y oportunidad y la recarga asociada a corredores interurbanos. Cada salida representa la prioridad relativa de las celdas para una misión de recarga concreta.

Los valores obtenidos no deben interpretarse como una probabilidad de implantación ni como la selección definitiva de un emplazamiento. Su función es establecer una jerarquía territorial dentro de cada submodelo, permitiendo identificar las zonas donde coinciden una mayor demanda potencial y unas condiciones más favorables según los criterios considerados.

Debido a que las tres misiones responden a necesidades distintas, sus puntuaciones no se integran en una única clasificación general. Los resultados se analizan por separado y posteriormente se comparan para identificar diferencias y coincidencias en su distribución territorial.

En los apartados siguientes se analiza la distribución espacial de cada salida y los principales patrones observados en Mallorca.

5.2 Resultados del submodelo de recarga residencial compartida

La aplicación del submodelo residencial genera una distribución espacial concentrada principalmente en los tejidos urbanos, aunque con diferencias importantes entre municipios. Tal como se observa en la salida cartográfica presentada en el apartado 4.8.2, las mayores prioridades se localizan en zonas donde la demanda residencial previamente identificada coincide con déficits de cobertura y condiciones favorables dentro de los criterios considerados por el modelo.

En total, 1.726 celdas presentan una prioridad residencial superior a cero. Sobre este conjunto, la puntuación media es de 0,467, mientras que el valor máximo alcanza 4,56. De las celdas con

prioridad positiva, 50 se sitúan en las categorías alta y muy alta, lo que muestra que las puntuaciones más elevadas se concentran en un número reducido de zonas.

La distribución municipal confirma una concentración importante en Palma. El municipio reúne 286 celdas con prioridad positiva y 24 de las 50 celdas clasificadas como alta o muy alta, es decir, el 48 % de las celdas pertenecientes a las dos categorías superiores. Palma también alcanza el valor máximo del submodelo, con una puntuación de 4,56.

Fuera de Palma, las mayores concentraciones de celdas de prioridad alta o muy alta aparecen en Manacor, con seis celdas, Sa Pobla, con cuatro, y Llucmajor y Marratxí, con tres cada uno. Felanitx presenta dos celdas dentro de estas categorías. Estos resultados muestran que la prioridad residencial no queda limitada al entorno metropolitano de Palma, sino que aparecen también ámbitos concretos de mayor prioridad en otros núcleos urbanos de Mallorca.

Municipio	Celdas con prioridad > 0	Celdas alta/muy alta	Prioridad media*	Prioridad máxima
Palma	286	24	1,099	4,56
Manacor	89	6	0,956	3,455
Sa Pobla	24	4	1,101	3,971
Llucmajor	87	3	0,666	3,452
Marratxí	91	3	0,979	3,366
Felanitx	50	2	0,828	2,941
Pollença	66	1	0,532	4,053

*Media calculada únicamente sobre las celdas con PRI_ZONA_RES_AJ > 0

Tabla 13 Principales municipios con presencia de celdas de prioridad residencial alta o muy alta. Fuente: resultados del Modelo Pi obtenidos en QGIS. Elaboración propia.

El análisis conjunto del número de celdas y de sus puntuaciones permite identificar diferencias que no serían visibles considerando únicamente la extensión de las zonas prioritarias. Por ejemplo, Sa Pobla presenta solo 24 celdas con prioridad positiva, pero cuatro de ellas pertenecen a las categorías alta o muy alta y su prioridad media alcanza 1,101, ligeramente superior a la registrada en Palma. De forma similar, Pollença presenta una única celda en las categorías superiores, pero esta alcanza una puntuación de 4,053, una de las más elevadas del submodelo. Por tanto, los resultados muestran dos patrones complementarios. Por una parte, Palma concentra una mayor extensión de zonas con prioridad residencial y casi la mitad de las celdas pertenecientes a las categorías superiores. Por otra, el modelo identifica necesidades más localizadas en otros municipios, donde un número menor de celdas puede alcanzar puntuaciones elevadas. Esta diferencia refuerza la conveniencia de analizar conjuntamente la distribución espacial y la intensidad de la prioridad, evitando interpretar el número total de celdas como único indicador de necesidad residencial.

5.3 Resultados del submodelo de recarga de destino y oportunidad

El submodelo de recarga de destino y oportunidad presenta una distribución territorial más dispersa que la obtenida para la recarga residencial compartida. En este caso, la prioridad se relaciona con la presencia de actividades generadoras de movilidad, población flotante, puntos de interés y otros destinos donde el vehículo puede permanecer estacionado durante el desarrollo de una actividad.

En total, 592 celdas presentan una prioridad superior a cero, con una puntuación media de 2,397 y un valor máximo de 6,607. De este conjunto, 73 celdas se sitúan en las categorías alta y muy alta, utilizando como límite inferior una puntuación de 4,129. Estas celdas representan aproximadamente el 12,3 % de las zonas con prioridad positiva, mostrando una mayor concentración de valores elevados que en el submodelo residencial.

La distribución municipal muestra que Palma concentra el mayor número de celdas con prioridad positiva, con 114, seguida de Calvià con 69. Sin embargo, la intensidad de la prioridad presenta una lectura diferente. Calvià alcanza el valor máximo del submodelo, con 6,607, y una prioridad media de 3,439, superior a la registrada en Palma, cuya media es de 2,479.

Las celdas pertenecientes a las categorías alta y muy alta se concentran principalmente en Calvià y Palma, con 23 y 20 respectivamente. Entre ambos municipios reúnen 43 de las 73 celdas de mayor prioridad, cerca del 59 % del total. También destacan Sant Llorenç des Cardassar, con nueve celdas, Alcúdia con siete y Capdepera con seis.

Municipio	Celdas con prioridad > 0	Celdas alta/muy alta	Prioridad media*	Prioridad máxima
Calvià	69	23	3,439	6,607
Palma	114	20	2,479	6,137
Sant Llorenç des Cardassar	20	9	3,549	5,773
Alcúdia	26	7	3,069	5,288
Capdepera	30	6	2,868	4,951
Santa Margalida	15	3	3,117	5,122
Llucmajor	20	2	1,858	5,454
Pollença	20	1	2,862	4,293
Santanyí	26	1	2,313	4,478
Son Servera	18	1	2,25	4,54

*Media calculada únicamente sobre las celdas con PRI_ZONA_DEST > 0.

Tabla 14 Principales municipios con presencia de celdas de prioridad alta o muy alta para la recarga de destino y oportunidad. Fuente: resultados del Modelo Pi obtenidos en QGIS. Elaboración propia.

Los resultados muestran que el número de celdas positivas y la intensidad de la prioridad no siguen necesariamente el mismo patrón. Sant Llorenç des Cardassar, por ejemplo, presenta

únicamente 20 celdas positivas, pero alcanza la mayor prioridad media entre los municipios destacados, con un valor de 3,549, y nueve de sus celdas pertenecen a las categorías alta o muy alta. Algo similar ocurre en Santa Margalida y Alcúdia, donde las puntuaciones medias son superiores a las observadas en Palma a pesar de contar con un número mucho menor de celdas. También se observa el caso contrario en Manacor, que presenta 31 celdas con prioridad positiva, situándose entre los municipios con mayor presencia de zonas de destino, pero su valor máximo es 4,124 y, por tanto, ninguna de sus celdas alcanza el umbral utilizado para las categorías alta y muy alta. Este resultado muestra la utilidad de diferenciar entre la extensión territorial de la prioridad y la intensidad alcanzada en determinadas zonas.

En conjunto, la salida de destino refleja una geografía asociada tanto al área metropolitana como a los principales ámbitos turísticos de Mallorca. Frente al patrón más urbano observado en la recarga residencial, las mayores prioridades de destino aparecen también en municipios costeros con una elevada concentración de actividad turística y de usos capaces de generar estancias temporales de vehículos.

5.4 Resultados del submodelo de corredores interurbanos

La aplicación del submodelo de corredores genera 278 celdas con prioridad superior a cero, distribuidas a lo largo de los ocho ejes interurbanos considerados. La puntuación media de estas celdas es de 1,859, mientras que el valor máximo alcanza 7,039.

La distribución de las celdas positivas no coincide necesariamente con la intensidad de la prioridad. El corredor C07 Manacor–Sant Llorenç–Son Servera presenta el mayor número de celdas con prioridad positiva, con 60, pero su puntuación media es de 1,260 y su máximo alcanza 2,663. Por el contrario, los corredores C01 Palma–Marratxí–Inca–Alcúdia y C02 Palma–Calvià–Andratx presentan una extensión menor, pero concentran las puntuaciones más elevadas del submodelo.

El corredor C01 alcanza una prioridad media de 3,781 y el máximo general de 7,039, mientras que C02 presenta una media de 3,165 y un máximo de 6,915. Ambos corredores coinciden con dos de los principales ejes de movilidad intermunicipal identificados previamente en el análisis origen-destino.

Corredor	Itinerario	Celdas > 0	Celdas alta	Prioridad media*	Prioridad máxima
C01	Palma–Marratxí–Inca–Alcúdia	51	10	3,781	7,039
C02	Palma–Calvià–Andratx	38	3	3,165	6,915

Corredor	Itinerario	Celdas > 0	Celdas alta	Prioridad media*	Prioridad máxima
C03	Palma–Llucmajor–Santanyí	46	0	1,991	3,405
C04	Palma–Bunyola	18	0	0,407	0,497
C05	Alcúdia–Pollença	23	0	0,642	1,069
C06	Alcúdia–Muro	27	0	0,119	0,238
C07	Manacor–Sant Llorenç–Son Servera	60	0	1,26	2,663
C08	Santanyí–Felanitx–Manacor	15	0	0,761	1,444

*Media calculada únicamente sobre las celdas con PRI_RUTA_AJ > 0.

Tabla 15 Distribución de la prioridad de recarga asociada a los corredores interurbanos. Fuente: resultados del Modelo Pi obtenidos en QGIS. Elaboración propia.

De las 278 celdas con prioridad positiva, 13 alcanzan la categoría alta, definida para valores superiores a 6. Diez pertenecen al corredor C01 y tres al C02. Ninguna celda alcanza la categoría muy alta, correspondiente a puntuaciones superiores a 8.

Este resultado muestra que una mayor longitud o un mayor número de celdas asociadas a un corredor no implica necesariamente una prioridad superior. C07 presenta la mayor extensión de celdas positivas, mientras que C01 y C02 concentran las puntuaciones más elevadas. La diferencia responde a que la prioridad final no depende únicamente de la intensidad de movilidad del corredor, sino también de las condiciones de cobertura, oportunidad eléctrica, presencia de estaciones de servicio y carácter interurbano consideradas por el modelo.

También se observa una diferencia importante entre C01, C02 y C03. Los tres forman parte de los principales ejes radiales con origen en Palma, pero C03 alcanza un máximo de 3,405 y no presenta celdas dentro de la categoría alta. Esto muestra cómo la aplicación de los criterios complementarios y del filtro territorial modifica la jerarquía inicialmente definida a partir de los flujos origen-destino.

La representación cartográfica presenta además discontinuidades en determinados tramos de los corredores, derivadas de la aplicación de VIAB_CELDA y del ajuste interurbano. Estas interrupciones forman parte del resultado del modelo y permiten diferenciar los sectores del corredor que mantienen condiciones compatibles con los criterios establecidos.

5.5 Comparación entre las tres misiones de recarga

Los resultados obtenidos muestran diferencias claras entre las tres misiones de recarga consideradas por el Modelo Pi. Aunque todas se calculan sobre la misma malla territorial y comparten criterios como la viabilidad, la cobertura existente y la oportunidad eléctrica, cada submodelo responde a una demanda diferente y genera una distribución espacial propia.

La comparación cuantitativa permite observar estas diferencias en términos de extensión y concentración de la prioridad:

Submodelo	Celdas con prioridad > 0	Prioridad media*	Celdas alta/muy alta	Prioridad máxima
Residencial compartida	1.726	0,467	50	4,56
Destino y oportunidad	592	2,397	73	6,607
Corredores interurbanos	278	1,859	13**	7,039

*Media calculada únicamente sobre las celdas con prioridad superior a cero.

**En el submodelo de corredores las 13 celdas corresponden a la categoría alta; ninguna alcanza la categoría muy alta.

Tabla 16 Comparación de las salidas finales del Modelo Pi según la misión de recarga. Fuente: e-distribución (2026), datos consultados en marzo de 2026. Elaboración propia en QGIS.

El submodelo residencial presenta la mayor extensión territorial, con 1.726 celdas de prioridad positiva, aunque solo 50 alcanzan las categorías alta o muy alta. Su distribución se concentra principalmente en Palma y otros núcleos urbanos.

La recarga de destino muestra una extensión menor, con 592 celdas positivas, pero concentra un mayor número de celdas en las categorías superiores. Su distribución se asocia principalmente a Palma, Calvià y otros municipios turísticos. Por su parte, el submodelo de corredores es el más limitado espacialmente, con 278 celdas positivas, y concentra sus mayores puntuaciones en los corredores C01 y C02.

En conjunto, cada misión genera un patrón territorial diferente. Por este motivo, las puntuaciones no deben utilizarse para establecer una jerarquía directa entre submodelos, sino para interpretar de forma independiente las zonas prioritarias asociadas a cada tipo de recarga.

5.6 Validación e interpretación de los resultados

La validación de los resultados se realiza mediante una comprobación de su coherencia espacial con los patrones territoriales y de movilidad analizados previamente. No se plantea como una validación estadística del modelo, ya que no se dispone de una base independiente de implantaciones futuras con la que contrastar directamente las zonas priorizadas.

En el submodelo residencial, la concentración de las mayores prioridades en Palma y otros núcleos urbanos resulta coherente con la distribución de la población, el parque de turismos, la tipología residencial y las diferencias detectadas en la disponibilidad de aparcamiento privado.

En la recarga de destino, la presencia de valores elevados en Palma, Calvià y otros municipios turísticos coincide con la localización de los principales polos de actividad, población flotante y puntos de interés considerados en el análisis. También mantiene relación con algunos de los vacíos de cobertura identificados previamente en nodos de elevada actividad.

Por su parte, los resultados del submodelo interurbano mantienen una correspondencia con las principales relaciones origen-destino analizadas. Los corredores C01 Palma–Marratxí–Inca–Alcúdia y C02 Palma–Calvià–Andratx concentran las mayores puntuaciones, mientras que la información de intensidad media diaria de tráfico se utilizó únicamente como referencia complementaria para comprobar la coherencia general de los ejes seleccionados.

En conjunto, estas comprobaciones permiten valorar la coherencia territorial de los resultados obtenidos, aunque no sustituyen una validación posterior mediante datos reales de utilización, demanda energética o nuevas implantaciones de infraestructura.

5.7 Síntesis de resultados

Los resultados muestran que la aplicación del Modelo Pi permite diferenciar territorialmente las necesidades asociadas a las tres misiones de recarga analizadas. La recarga residencial presenta una distribución más vinculada a los núcleos urbanos, la recarga de destino concentra sus mayores prioridades en polos de actividad y municipios turísticos, y la recarga interurbana identifica sectores concretos de los principales corredores de movilidad.

La utilización de una malla común permite integrar estas diferencias manteniendo criterios compartidos de viabilidad territorial, cobertura existente y oportunidad eléctrica. Al mismo tiempo, la separación entre submodelos evita asumir que una única localización responde de igual forma a todas las necesidades de recarga.

Estos resultados constituyen la base para valorar en el capítulo de Conclusiones el cumplimiento de los objetivos planteados, las principales aportaciones del Modelo Pi y sus limitaciones.

6. CONCLUSIONES

La planificación de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos requiere considerar de forma conjunta factores que normalmente se analizan de manera separada. La demanda potencial, la infraestructura existente, la disponibilidad territorial, las condiciones de la red eléctrica y el tipo de utilización de la recarga presentan distribuciones espaciales diferentes y no permiten identificar una única solución válida para todos los usuarios.

A partir de esta premisa, el presente trabajo ha desarrollado y aplicado en Mallorca el Modelo Pi, una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en análisis espacial multicriterio mediante QGIS. El modelo integra diferentes fuentes de información sobre una malla común de 500 × 500 m y diferencia tres misiones de recarga: residencial compartida, destino y oportunidad, y corredores interurbanos.

La aplicación realizada permite pasar de un diagnóstico general de la movilidad eléctrica a una priorización espacial relativa, manteniendo separadas las necesidades asociadas a cada tipo de recarga. Los resultados obtenidos muestran que las tres misiones presentan patrones territoriales claramente diferenciados, lo que confirma la conveniencia de evitar una planificación basada únicamente en la cobertura geográfica de la red existente o en un único indicador de demanda.

6.1 Principales conclusiones del estudio

La primera conclusión es que la necesidad de infraestructura de recarga en Mallorca no presenta una distribución territorial homogénea. La aplicación de los tres submodelos genera geografías de prioridad distintas, vinculadas al tipo de usuario y a la función que debe cumplir la infraestructura.

6.1.1. la recarga residencial compartida

El modelo identifica 1.726 celdas con prioridad positiva, aunque solo 50 alcanzan las categorías alta o muy alta. Palma concentra una parte importante de estas zonas y reúne 24 de las 50 celdas de mayor prioridad. Sin embargo, también aparecen necesidades localizadas en municipios como Manacor, Sa Pobla, Llucmajor o Marratxí.

Este resultado muestra que la presión residencial no depende únicamente del volumen de población o del parque móvil, sino también de las características del tejido urbano, la disponibilidad relativa de aparcamiento privado y la cobertura existente.

6.1.2. Recarga de destino y oportunidad

La recarga de destino presenta una distribución más vinculada a la actividad urbana y turística. Se obtienen 592 celdas con prioridad positiva, de las cuales 73 pertenecen a las categorías alta o muy alta.

Palma concentra el mayor número de celdas positivas, mientras que Calvià alcanza el valor máximo del submodelo. También destacan municipios turísticos como Sant Llorenç des Cardassar, Alcúdia, Capdepera y Santa Margalida. La distribución obtenida refleja la importancia de considerar la población flotante, los puntos de interés y los principales destinos de movilidad junto con la población residente.

6.1.3. Recarga asociada a corredores interurbanos

La recarga asociada a corredores presenta una distribución espacial más concentrada, con 278 celdas de prioridad positiva. Las mayores puntuaciones se localizan en los corredores C01 Palma–Marratxí–Inca–Alcúdia y C02 Palma–Calvià–Andratx, que reúnen las 13 celdas clasificadas con prioridad alta.

El resultado muestra que la intensidad de los flujos origen-destino es un elemento relevante, pero que la prioridad final también depende de la viabilidad territorial, la cobertura existente, la oportunidad eléctrica y el carácter interurbano de cada zona.

6.1.4. Conclusiones transversales

Otra conclusión relevante es que la existencia de infraestructura próxima no implica necesariamente una cobertura funcional suficiente. Los análisis realizados en nodos como el Aeropuerto de Son Sant Joan o el Hospital Universitario Son Espases muestran que la proximidad física de un punto de recarga debe interpretarse conjuntamente con su función, accesibilidad y tipo de usuario.

La incorporación de la información eléctrica también mejora la lectura territorial del problema. La capacidad de acceso publicada por e-distribución constituye un indicador útil para identificar zonas con mejores condiciones preliminares de conexión, pero no puede utilizarse como garantía de capacidad disponible ni como criterio automático de exclusión. Por este motivo, el Modelo Pi la incorpora como una variable de oportunidad y mantiene la necesidad de realizar posteriormente un estudio específico de acceso y conexión.

Finalmente, la aplicación del modelo muestra la utilidad de trabajar con tres salidas independientes en lugar de construir una única clasificación territorial. Una misma celda puede responder de forma diferente a una necesidad residencial, de destino o interurbana. Esta

separación permite conservar la lógica funcional de cada misión de recarga y facilita una interpretación más adecuada de las prioridades obtenidas.

6.2 Cumplimiento de los objetivos

Los resultados obtenidos permiten valorar el grado de cumplimiento de los objetivos generales y específicos planteados al inicio del trabajo. Esta valoración se presenta siguiendo las tres líneas principales del estudio: el marco estratégico y normativo, el diagnóstico territorial de la infraestructura existente y el desarrollo del Modelo Pi como herramienta de apoyo a la planificación.

6.2.1. Cumplimiento del Objetivo General G.1

El Objetivo General G.1, orientado a contribuir al desarrollo de una infraestructura pública de recarga coherente con los objetivos climáticos y de movilidad sostenible establecidos por la Unión Europea, se ha abordado mediante el análisis del contexto normativo, técnico y estratégico en el que se produce actualmente el despliegue de la movilidad eléctrica.

En relación con el objetivo G.1.1, se ha analizado el marco regulatorio y estratégico aplicable, considerando la normativa europea, estatal y autonómica, con especial atención al Reglamento AFIR, el PNIEC y la normativa de las Illes Balears. Este análisis ha permitido establecer las condiciones generales que deben considerarse en la planificación de nueva infraestructura de recarga.

El objetivo G.1.2 se ha desarrollado mediante la revisión de los principales requerimientos técnicos, funcionales y de servicio asociados a la infraestructura pública de recarga, incluyendo aspectos relacionados con las condiciones de acceso, la conexión a la red eléctrica, la tramitación administrativa y las características funcionales que condicionan su utilización.

Por su parte, el objetivo G.1.3 se ha cumplido mediante la revisión de experiencias y metodologías desarrolladas en países con un elevado grado de implantación de la movilidad eléctrica, especialmente Noruega, Alemania y Países Bajos. Estas referencias permitieron identificar enfoques de planificación, gestión de información y localización de infraestructura útiles como referencia para el planteamiento del modelo desarrollado.

En consecuencia, se considera alcanzado el Objetivo General G.1, al haberse establecido un marco de referencia normativo, técnico y metodológico sobre el que fundamentar el resto del trabajo.

6.2.2. Cumplimiento del Objetivo General G.2

El Objetivo General G.2 planteaba favorecer una planificación eficiente, equilibrada y territorialmente coherente de la red pública de recarga en Mallorca. Para ello se realizó un diagnóstico de la infraestructura existente y de su relación con las características territoriales y de movilidad de la isla.

El objetivo G.2.1, dirigido a analizar las características generales y la distribución funcional de la infraestructura existente, se ha desarrollado mediante la integración de información procedente del Geoportal del MITECO, la red MELIB y Electromaps. La depuración de duplicidades permitió disponer de una representación conjunta de la infraestructura y estudiar su distribución sobre el territorio.

En relación con el objetivo G.2.2, la cobertura existente se ha analizado conjuntamente con variables relacionadas con la estructura urbana, la distribución de la población, la actividad turística, la población flotante y la movilidad intermunicipal. Esta aproximación permite considerar las particularidades de Mallorca, especialmente la concentración espacial de determinadas actividades y la variación estacional de la demanda.

El objetivo G.2.3 se ha abordado mediante la identificación de déficits de cobertura y zonas con oportunidades de mejora. El análisis realizado muestra que la proximidad física a una estación de recarga no implica necesariamente una cobertura funcional suficiente, especialmente en nodos de elevada actividad o con perfiles de utilización específicos.

De este modo, se considera alcanzado el Objetivo General G.2, al haberse obtenido un diagnóstico territorial que permite identificar diferencias en las necesidades de recarga y utilizar esta información posteriormente dentro del proceso de priorización.

6.2.3. Cumplimiento del Objetivo General G.3

El Objetivo General G.3 constituye el núcleo metodológico del trabajo y se orienta al desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para orientar futuras inversiones y actuaciones sobre la infraestructura de recarga de Mallorca.

El objetivo G.3.1 se ha cumplido mediante la definición e integración de criterios técnicos, territoriales, energéticos y socioeconómicos. Entre ellos se encuentran la viabilidad territorial, la demanda potencial, la cobertura existente, la oportunidad eléctrica y diferentes variables funcionales asociadas a cada tipo de recarga.

En cumplimiento del objetivo G.3.2, se ha desarrollado el Modelo Pi, una herramienta de análisis espacial multicriterio implementada en QGIS sobre una malla común de 500 × 500 m. El modelo permite priorizar zonas candidatas para futuras actuaciones y genera tres salidas independientes correspondientes a la recarga residencial compartida, la recarga de destino y oportunidad y la

recarga asociada a corredores interurbanos. Estas salidas identifican prioridades relativas dentro de cada misión de recarga y constituyen una base para posteriores estudios de detalle.

Finalmente, el objetivo G.3.3 se ha abordado mediante la aplicación completa del Modelo Pi al caso de Mallorca. Los resultados obtenidos presentan patrones territoriales diferenciados y coherentes con las características de demanda, movilidad, cobertura e infraestructura analizadas previamente. Esta aplicación permite realizar la validación conceptual prevista, comprobando la aplicabilidad del procedimiento sobre un caso real, sin que ello implique una validación estadística o predictiva del modelo.

Por tanto, se considera alcanzado el Objetivo General G.3, al haberse desarrollado una herramienta reproducible de apoyo a la planificación territorial y haberse comprobado su aplicación al territorio de Mallorca.

6.3 Alcance y limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del alcance definido para el trabajo. El Modelo Pi se plantea como una herramienta de apoyo a la planificación territorial de la infraestructura de recarga, orientada a identificar zonas con diferente prioridad relativa según la misión de recarga analizada. En consecuencia, el modelo no determina ubicaciones definitivas para nuevas instalaciones, sino que establece una primera selección territorial sobre la que deberán desarrollarse estudios posteriores de mayor detalle.

Una de las principales limitaciones del estudio está asociada a la disponibilidad y nivel de desagregación de determinadas fuentes de información. Aunque se han integrado datos procedentes de distintos organismos y plataformas, no se dispone de información homogénea sobre utilización real de los puntos de recarga, niveles de ocupación, energía suministrada o disponibilidad operativa. Del mismo modo, algunas variables vinculadas a la actividad turística y a las flotas de alquiler presentan una disponibilidad limitada a escala municipal o insular.

La información de capacidad eléctrica publicada por e-distribución se ha utilizado como indicador de oportunidad territorial, pero no representa una garantía de capacidad efectiva de conexión para una instalación concreta. La viabilidad eléctrica definitiva de cualquier actuación requerirá el correspondiente estudio de acceso y conexión y la comprobación de las condiciones reales de la red en el momento de su tramitación.

Por otra parte, las ponderaciones y umbrales utilizados en el Modelo Pi responden al planteamiento metodológico definido en este trabajo. Aunque permiten estructurar de forma coherente la comparación entre variables, no se ha realizado un análisis formal de sensibilidad que permita evaluar cómo variarían los resultados ante otras combinaciones de pesos o umbrales.

Finalmente, la aplicación al caso de Mallorca permite comprobar la aplicabilidad conceptual y territorial del procedimiento y analizar la coherencia de los patrones obtenidos. No obstante, esta comprobación no constituye una validación estadística o predictiva del modelo, que requeriría disponer de datos independientes de demanda real o de utilización futura de la infraestructura.

6.4 Líneas futuras de desarrollo

Las principales líneas futuras de desarrollo del Modelo Pi se relacionan con la incorporación de información más detallada y actualizada. En este sentido, disponer de datos reales de utilización de los puntos de recarga, niveles de ocupación, energía suministrada y disponibilidad operativa permitiría contrastar con mayor precisión la prioridad territorial estimada con el comportamiento efectivo de la demanda.

También resultaría de interés mejorar la componente eléctrica mediante información más detallada sobre capacidad de conexión y evolución prevista de la red de distribución. Del mismo modo, la actualización periódica del parque de vehículos eléctricos, la infraestructura existente y las variables vinculadas a la actividad turística permitiría mantener el modelo adaptado a la evolución de la movilidad en Mallorca.

Otra línea de desarrollo sería la realización de análisis de sensibilidad sobre los pesos y umbrales utilizados, con el fin de comprobar la estabilidad de los resultados ante distintas configuraciones y reforzar la robustez metodológica del modelo.

Finalmente, una vez identificadas las zonas prioritarias, podría desarrollarse una segunda fase de análisis orientada a estudiar emplazamientos concretos mediante criterios de mayor detalle, como accesibilidad, disponibilidad física del suelo, afecciones urbanísticas o condiciones de conexión. Asimismo, la aplicación del Modelo Pi en otros territorios permitiría analizar su transferibilidad y adaptar la metodología a contextos diferentes.

7. ESTRATEGIA DE SOSTENIBILIDAD

La planificación de una red de recarga para vehículos eléctricos no depende únicamente de encontrar ubicaciones donde técnicamente sea posible instalar nuevos puntos. También resulta necesario considerar dónde existe una mayor necesidad de recarga, qué zonas presentan mejores condiciones territoriales y hasta qué punto las nuevas instalaciones pueden aprovechar espacios e infraestructuras ya existentes.

Esta idea está presente en el planteamiento del Modelo Pi. El modelo combina información sobre demanda potencial, características del territorio y red eléctrica con el objetivo de identificar las zonas de Mallorca que presentan mejores condiciones para el despliegue de nueva infraestructura de recarga. De esta forma, la sostenibilidad no se incorpora como un criterio independiente al final del análisis, sino que forma parte de algunas de las variables utilizadas para determinar la idoneidad territorial.

Este planteamiento puede relacionarse con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de Naciones Unidas, especialmente aquellos vinculados con el desarrollo de infraestructuras y la planificación de ciudades y comunidades sostenibles (Naciones Unidas, 2015).

7.1 Alineación Estratégica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La relación del Modelo Pi con los ODS se concentra principalmente en dos objetivos: el ODS 9, relacionado con la industria, la innovación y las infraestructuras, y el ODS 11, centrado en el desarrollo de ciudades y comunidades sostenibles.

- **ODS 9. Industria, innovación e infraestructura.** El Modelo Pi plantea una forma de planificar la infraestructura de recarga a partir del análisis conjunto de diferentes fuentes de información. En lugar de localizar nuevos puntos únicamente en función de la disponibilidad de espacio o de actuaciones puntuales, se tienen en cuenta variables relacionadas con la demanda, el territorio y la red eléctrica. Esta metodología permite apoyar la toma de decisiones con información objetiva y puede facilitar una planificación más ordenada de la infraestructura.
- **ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.** La relación con este objetivo aparece principalmente en la dimensión territorial y social del modelo. Una de las variables consideradas es la dificultad de acceso a la recarga privada en determinadas zonas residenciales. Las áreas con menor disponibilidad de aparcamiento privado pueden presentar una mayor dependencia de soluciones de recarga pública o compartida. Incorporar esta circunstancia permite que el análisis no se limite a estudiar dónde puede instalarse un punto de recarga, sino también dónde puede resultar más necesario.

La vinculación con estos ODS debe entenderse como una alineación general con los objetivos de sostenibilidad de la Agenda 2030 y no como una evaluación formal de su cumplimiento. El Modelo Pi es, ante todo, una herramienta de apoyo a la planificación, por lo que su aportación se encuentra en introducir criterios territoriales, sociales y técnicos en las primeras fases de decisión sobre dónde resulta más conveniente ampliar la infraestructura de recarga.

7.2 Indicadores de seguimiento de la sostenibilidad del Modelo Pi

Una vez obtenidos los resultados del modelo, es posible utilizar algunos indicadores sencillos para analizar las características de las zonas identificadas como más favorables. Estos indicadores no pretenden medir el impacto ambiental real de las futuras instalaciones, ya que para ello sería necesario conocer posteriormente aspectos como su utilización, consumo energético o número de vehículos atendidos. Su finalidad es complementar la interpretación del mapa final de idoneidad.

Indicador	Qué permite observar	Relación
Aprovechamiento de suelo transformado	Proporción de zonas de alta idoneidad situadas en suelo urbano, industrial, terciario o previamente transformado.	ODS 9 y 11
Accesibilidad residencial	Presencia de zonas prioritarias en áreas residenciales con menor disponibilidad de aparcamiento privado.	ODS 11
Cobertura de la demanda potencial	Correspondencia entre las zonas de mayor idoneidad y los ámbitos donde el modelo identifica una mayor demanda residencial, turística o asociada a nodos de movilidad.	ODS 9 y 11
Compatibilidad inicial con la red eléctrica	Presencia de zonas prioritarias próximas a nodos con condiciones favorables de capacidad publicada, sin considerar esta información como una garantía de conexión.	ODS 9

Tabla 17 Indicadores de seguimiento de la sostenibilidad del Modelo Pi. Fuente: criterios del Modelo Pi y de Naciones Unidas (2015). Elaboración propia.

Los indicadores propuestos permiten complementar la lectura del mapa final de idoneidad y comprobar si las zonas prioritarias mantienen coherencia con los criterios de sostenibilidad incorporados al modelo.

El aprovechamiento de suelo transformado permite valorar si las áreas de mayor idoneidad se concentran en espacios ya urbanizados o productivos. La accesibilidad residencial ayuda a identificar zonas donde la recarga privada puede resultar más limitada, mientras que la cobertura de la demanda permite relacionar los resultados con los principales focos residenciales, turísticos y de movilidad. Por último, la compatibilidad inicial con la red eléctrica permite comprobar si las

zonas prioritarias presentan condiciones favorables de capacidad publicada, sin que ello suponga una garantía de conexión.

En conjunto, estos indicadores facilitan una interpretación más completa de los resultados del Modelo Pi y permiten vincularlos con los ODS 9 y 11 sin atribuir al modelo efectos que no hayan sido evaluados directamente.

8. BIBLIOGRAFÍA

Adenaw, L., & Krapf, S. (2022). Placing BEV charging infrastructure: Influencing factors, metrics, and their influence on observed charger utilization. *World Electric Vehicle Journal*, *13*(4), 56. https://doi.org/10.3390/wevj13040056

Adenaw, L., & Lienkamp, M. (2021). Multi-criteria, co-evolutionary charging behavior: An agent-based simulation of urban electromobility. *World Electric Vehicle Journal*, *12*(1), 18. https://doi.org/10.3390/wevj12010018

Agencia de Estrategia Turística de las Illes Balears. (s. f.). *Alojamientos turísticos* [Conjunto de datos]. Govern de les Illes Balears. Recuperado el 17 de agosto de 2026, de https://www.caib.es/sites/estadistiquesdelturisme/es/alojamientos_turisticos-33206/

Anderson, J. E., Bergfeld, M., Nguyen, D. M., & Steck, F. (2023). Real-world charging behavior and preferences of electric vehicles users in Germany. *International Journal of Sustainable Transportation*, *17*(9), 1032–1046. https://doi.org/10.1080/15568318.2022.2147041

Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones. (2025). *Barómetro de electromovilidad: 3er trimestre de 2025*. https://anfac.com/publicaciones/barometro-electromovilidad-3er-trimestre-2025/

Bao, Q., Gao, M., Chen, J., & Tan, X. (2024). Location and size planning of charging parking lots based on EV charging demand prediction and fuzzy bi-objective optimization. *Mathematics*, *12*, 3143. https://doi.org/10.3390/math12193143

Bjerkan, K. Y., Nørbech, T. E., & Nordtømme, M. E. (2016). Incentives for promoting Battery Electric Vehicle (BEV) adoption in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *43*, 169-180. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.002

Cañigueral, M. (2023). *Modelling of electric vehicle user profiles for flexibility management and charging infrastructure planning* [Tesis doctoral, Universitat de Girona]. TDX. http://hdl.handle.net/10803/689718

Charly, A., Thomas, N. J., Foley, A., & Caulfield, B. (2023). Identifying optimal locations for community electric vehicle charging. *Sustainable Cities and Society*, *94*, 104573. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104573

Chen, Z., Li, C., Chen, X., & Yang, Q. (2020). Towards optimal planning of EV charging stations under grid constraints. *IFAC-PapersOnLine*, *53*(2), 14103–14108. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1005

Consell de Mallorca. (2024, octubre). *Estudio de la capacidad de carga de la Red Viaria del Consell de Mallorca* [Informe técnico].

Consell de Mallorca. (2025). *Intensitat mitjana diària de vehicles 2025* [Mapa]. https://www.conselldemallorca.es/documents/774813/882786/IMD+2025.+MAPA+AFORAMENTS_2025.pdf/3eacb3dc-9214-b7eb-4e18-9eb4ccf6b828?t=1784111320670

Cooper, J., Krishnadas, A., & Ghosh, B. (2025). Spatial estimation of charging infrastructure to enable electric vehicle transition: A case study of Ireland. *IFAC-PapersOnLine*, *59*(21), 78–83. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.11.591

De Miguel Muñoz, E. M., Berntzen, L., & Johannessen, M. R. (2023). Driving the future: A comparative analysis of electric vehicle trends in Norway and Spain. En *SMART 2023: The Twelfth International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies* (pp. 32–41). IARIA. https://www.thinkmind.org/library/SMART/SMART_2023/smart_2023_1_70_40034.html

Deb, S., Tammi, K., Kalita, K., & Mahanta, P. (2019). Charging station placement for electric vehicles: A case study of Guwahati City, India. *IEEE Access*, *7*, 100270–100282. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931055

Dirección General de Tráfico. (2025). *Panel de datos del parque de vehículos* [Conjunto de datos]. https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Panel-de-datos-del-parque-de-vehiculos

Dirección General de Tráfico. (2026). *Datos municipales – información general 2025* [Conjunto de datos]. https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Datos-municipales-informacion-general-2025

Dirección General del Catastro. (s. f.). *Descarga de información alfanumérica (formato CAT)* [Conjunto de datos]. Sede Electrónica del Catastro. https://www.sedecatastro.gob.es/Accesos/SECAccDescargaDatos.aspx

Dong, J., Liu, C., & Lin, Z. (2014). Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *38*, 44–55. https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.11.001

e-distribución Redes Digitales, S.L.U. (2026). *Capacidades de acceso firme de la demanda en nodos de red* [Conjunto de datos]. https://www.edistribucion.com/es/red-electrica/nodos-capacidad-red/capacidad-demanda.html

Electromaps. (s. f.). *Mapa con todos los puntos de recarga para vehículos eléctricos*. Recuperado el 16 de agosto de 2026, de https://map.electromaps.com/es/

Endesa X Way, S.L. (s. f.). *Estaciones de recarga*. Recuperado el 16 de agosto de 2026, de https://www.endesaxway.com/es/es/nuestra-oferta/estaciones-de-recarga-publicas

Erbaş, M., Kabak, M., Özceylan, E., & Çetinkaya, C. (2018). Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. *Energy*, *163*, 1017–1031. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.140

European Environment Agency. (2023). *Europe's air quality status 2023* (Briefing No. 05/2023). https://doi.org/10.2800/59526

European Environment Agency. (2024). *Sustainability of Europe's mobility systems* (Web report No. 01/2024). https://doi.org/10.2800/8560026

European Environment Agency. (s. f.). *European Air Quality Index* [Mapa interactivo]. Recuperado el 22 de agosto de 2026, de https://airindex.eea.europa.eu/AQI/

Federal Ministry for Digital and Transport. (2022). *Charging infrastructure masterplan II*. https://www.bmv.de/SharedDocs/EN/publications/charging-infrastructure-masterplan-ii.pdf?__blob=publicationFile

Figenbaum, E., Wangsness, P. B., Amundsen, A. H., & Milch, V. (2022). Empirical analysis of the user needs and the business models in the Norwegian charging infrastructure ecosystem. *World Electric Vehicle Journal*, *13*(10), 185. https://doi.org/10.3390/wevj13100185

Frade, I., Ribeiro, A., Gonçalves, G., & Antunes, A. P. (2011). Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transportation Research Record*, *2252*(1), 91–98. https://doi.org/10.3141/2252-12

Gerossier, A., Girard, R., & Kariniotakis, G. (2019). Modeling and forecasting electric vehicle consumption profiles. *Energies*, *12*(7), 1341. https://doi.org/10.3390/en12071341

Gnann, T., Funke, S., Jakobsson, N., Plötz, P., Sprei, F., & Bennehag, A. (2018). Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *62*, 314–329. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.004

Govern de les Illes Balears. (2022). *Plan de inversiones para la transición energética Baleares*. Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP). https://femp-fondos-europa.es/wp-content/uploads/2022/03/140322-plan_de_inversiones_para-_transicion_energetica_baleares.pdf

Güler, D., & Yomralıoğlu, T. (2020). Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. *Annals of GIS*, *26*(2), 169–189. https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1737226

Hardman, S., Jenn, A., Tal, G., Axsen, J., Beard, G., Daina, N., Figenbaum, E., Jakobsson, N., Jochem, P., Kinnear, N., Plötz, P., Pontes, J., Refa, N., Sprei, F., Turrentine, T., & Witkamp, B. (2018). A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *62*, 508–523. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.002

He, S. Y., Kuo, Y.-H., & Sun, K. K. (2022). The spatial planning of public electric vehicle charging infrastructure in a high-density city using a contextualised location-allocation model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *160*, 21–44. https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.02.012

Henriksen, I. M., Throndsen, W., Ryghaug, M., & Skjølsvold, T. M. (2021). Electric vehicle charging and end-user motivation for flexibility: A case study from Norway. *Energy, Sustainability and Society*, *11*, 44. https://doi.org/10.1186/s13705-021-00319-z

Hodgson, M. J. (1990). A flow-capturing location-allocation model. *Geographical Analysis*, *22*(3), 270–279. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1990.tb00210.x

Huang, K., Kanaroglou, P., & Zhang, X. (2016). The design of electric vehicle charging network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *49*, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.028

Institut Balear de l'Energia. (s. f.). *Movilidad eléctrica*. Recuperado el 16 de agosto de 2026, de https://institutbalearenergia.com/es/red-melib/

Institut Cartogràfic i Geogràfic de les Illes Balears. (s. f.). *Geoportal de la infraestructura de dades espacials de les Illes Balears (ideIB): Visor general*. Recuperado el 16 de agosto de 2026, de https://ideib.caib.es/visor/?locale=es

Instituto Nacional de Estadística. (2026). *Medición del turismo nacional y receptor a partir de la posición de los teléfonos móviles* [Conjunto de datos]. Recuperado el 17 de agosto de 2026, de https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=8578&capsel=8579

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Federación Española de Municipios y Provincias, & Asociación Empresarial para el Desarrollo e Impulso de la Movilidad Eléctrica. (2025). *Guía práctica para los municipios: Despliegue de infraestructura de recarga del vehículo eléctrico. Papel del ayuntamiento en la tramitación administrativa de los puntos de recarga*. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/idae/tecnologias/ahorro_y_eficiencia_energetica/transporte/GTIRVE/Guia_municipios_GTIRVE_AEDIVE_Y_FEMP_01102025.pdf

International Energy Agency. (2025). *Global EV outlook 2025: Expanding sales in diverse markets*. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025

Ji, J., Chen, H., Zhang, J., Su, J., Li, H., Niu, T., Fang, S., Chen, G., & Liao, R. (2025). Planning method for electric vehicle charging stations considering dynamic traffic load demand prediction. *Energy Internet*, *2*, 241–254. https://doi.org/10.1049/ein2.70005

Kuby, M., & Lim, S. (2005). The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. *Socio-Economic Planning Sciences*, *39*(2), 125–145. https://doi.org/10.1016/j.seps.2004.03.001

Ley 10/2019, de 22 de febrero, de cambio climático y transición energética. *Boletín Oficial de las Illes Balears*, núm. 27, de 2 de marzo de 2019. https://www.boe.es/eli/es-ib/l/2019/02/22/10/con

Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. Boletín Oficial del Estado, núm. 121, de 21 de mayo de 2021, pp. 62009–62052.

Li, Y., & Jenn, A. (2024). Impact of electric vehicle charging demand on power distribution grid congestion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *121*(18), e2317599121. https://doi.org/10.1073/pnas.2317599121

Loehr, J. M., & Hanken, M. (2025). From Jump-Start to Phase-Out: Transitioning Policy Making Towards a Primarily Market Driven Charging Infrastructure Rollout in Germany. *World Electric Vehicle Journal*, *16*(6), 300. https://doi.org/10.3390/wevj16060300

López, M. (2025). *V informe: Movilidad eléctrica en España. Situación actual, objetivos y retos a abordar*. OBS Business School.

Lorentzen, E., Haugneland, P., Bu, C., & Hauge, E. (2017). *Charging infrastructure experiences in Norway—The world's most advanced EV market* [Conference paper]. EVS30 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stuttgart, Germany.

Märtz, A., Langenmayr, U., Ried, S., Seddig, K., & Jochem, P. (2022). Charging behavior of electric vehicles: Temporal clustering based on real-world data. *Energies*, *15*(18), 6575. https://doi.org/10.3390/en15186575

Metais, M. O., Jouini, O., Perez, Y., Berrada, J., & Suomalainen, E. (2022). Too much or not enough? Planning electric vehicle charging infrastructure: A review of modeling options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *153*, 111719. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111719

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *Plan nacional integrado de energía y clima (PNIEC 2023-2030)*. https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/pniec-23-30.html

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2026). *Puntos de recarga de vehículos eléctricos* [Conjunto de datos]. Catálogo de Datos Abiertos del MITECO. https://geoportalgasolineras.es/geoportal-instalaciones/DescargarFicheros

Mortimer, B. J., Bach, A. D., Hecht, C., Sauer, D. U., & De Doncker, R. W. (2022). Public charging infrastructure in Germany—A utilization and profitability analysis. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *10*(6), 1750–1760. https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000181

Mortimer, B. J., Hecht, C., Goldbeck, R., Sauer, D. U., & De Doncker, R. W. (2022). Electric vehicle public charging infrastructure planning using real-world charging data. *World Electric Vehicle Journal*, *13*(6), 94. https://doi.org/10.3390/wevj13060094

Motoaki, Y. (2019). Location-allocation of electric vehicle fast chargers—Research and practice. *World Electric Vehicle Journal*, *10*(1), 12. https://doi.org/10.3390/wevj10010012

Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (A/RES/70/1). https://sdgs.un.org/es/2030agenda

Nationale Agenda Laadinfrastructuur. (2019). *Nationale Agenda Laadinfrastructuur*. https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/ondersteuning+gemeenten/documenten+en+links/documenten+in+bibliotheek/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=1773453

Nationale Agenda Laadinfrastructuur. (2022). *Smart charging for all 2022–2025: Action plan*. https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/english/documents/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2498802

NOBIL. (s. f.). *Welcome to the charging station database NOBIL*. Recuperado el 24 de agosto de 2026, de https://info.nobil.no/english

OpenStreetMap contributors. (s. f.). *OpenStreetMap* [Conjunto de datos cartográficos]. Recuperado el 17 de agosto de 2026, de https://www.openstreetmap.org/

Pagany, R., Marquardt, A., & Zink, R. (2019). Electric charging demand location model—A user- and destination-based locating approach for electric vehicle charging stations. *Sustainability*, *11*(8), 2301. https://doi.org/10.3390/su11082301

Pagany, R., Ramirez Camargo, L., & Dorner, W. (2019). A review of spatial localization methodologies for the electric vehicle charging infrastructure. *International Journal of Sustainable Transportation*, *13*(6), 433–449. https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1481243

Raveendran, V., Alvarez-Bel, C., & Nair, M. G. (2020). Assessing the ancillary service potential of electric vehicles to support renewable energy integration in touristic islands: A case study from Balearic island of Menorca. *Renewable Energy*, *161*, 495–509. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.083

Real Decreto 1052/2022, de 27 de diciembre, por el que se regulan las zonas de bajas emisiones. Boletín Oficial del Estado, núm. 311, de 28 de diciembre de 2022, pp. 185962–185981.

Real Decreto 184/2022, de 8 de marzo, por el que se regula la actividad de prestación de servicios de recarga energética de vehículos eléctricos. Boletín Oficial del Estado, núm. 67, de 19 de marzo de 2022, pp. 35694–35709.

Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica. Boletín Oficial del Estado, núm. 175, de 24 de junio de 2020, pp. 43879–43927.

Real Decreto-ley 29/2021, de 21 de diciembre, por el que se adoptan medidas urgentes en el ámbito energético para el fomento de la movilidad eléctrica, el autoconsumo y el despliegue de energías renovables. Boletín Oficial del Estado, núm. 305, de 22 de diciembre de 2021, pp. 156797–156830.

Red Eléctrica de España. (2025a). *El sistema eléctrico en Baleares. Datos a 31 de diciembre de 2024*. https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2025/07/downloadable/Baleares.pdf

Red Eléctrica de España. (2025b). *Las Illes Balears producen con solar fotovoltaica un 30 % más de electricidad en 2024 y alcanzan su máximo histórico en renovables* [Nota de prensa]. https://www.ree.es/sites/default/files/07_SALA_PRENSA/Documentos/2025/NP_Baleares.pdf

Reglamento (UE) 2023/1804 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023, relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE. Diario Oficial de la Unión Europea, L 234, 1–47. http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj

Resolución de 11 de diciembre de 2019, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se aprueban determinados procedimientos de operación para su adaptación al Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 305, de 20 de diciembre de 2019, pp. 137787–138065.

Resolución de 24 de julio de 2012, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se aprueba la modificación de los procedimientos de operación del Sistema Eléctrico Peninsular (SEP) P.O.-3.1, P.O.-3.2, P.O.-9 y P.O.-14.4 y los procedimientos de operación de los Sistemas Eléctricos Insulares y Extrapeninsulares (SEIE) P.O. SEIE-1, P.O. SEIE-2.2, P.O. SEIE-3.1, P.O. SEIE-7.1, P.O. SEIE-7.2, P.O. SEIE-8.2, P.O. SEIE-9 y P.O. SEIE-2.3 para su adaptación a la nueva normativa eléctrica. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 191, de 10 de agosto de 2012, pp. 57263–57495.

Schulz, F., & Rode, J. (2021). *Public charging infrastructure and electric vehicles in Norway* (Documento de trabajo No. 3931394). SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.3931394

Shahraki, N., Cai, H., Turkay, M., & Xu, M. (2015). Optimal locations of electric public charging stations using real world vehicle travel patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *41*, 165–176. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.011

Signorile, F., Mastromarino, F., Scarabaggio, P., Gialò, V., Carli, R., & Dotoli, M. (2025). Optimal positioning of electric vehicle chargers for efficient land use in smart cities: Integration with fuel stations. *IFAC-PapersOnLine*, *59*(9), 315–320. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.08.156

Tayri, A., & Ma, X. (2025). Grid impacts of electric vehicle charging: A review of challenges and mitigation strategies. *Energies*, *18*(14), 3807. https://doi.org/10.3390/en18143807

Tian, H., Sun, Y., Hu, F., & Du, J. (2023). Charging behavior analysis based on operation data of private BEV customers in Beijing. *Electronics*, *12*(2), 373. https://doi.org/10.3390/electronics12020373

van den Hoed, R., Maase, S., Helmus, J., Wolbertus, R., el Bouhassani, Y., Dam, J., Tamis, M., & Jablonska, B. (2019). *E-mobility: Getting smart with data*. Hogeschool van Amsterdam. https://research.hva.nl/en/publications/e-mobility-getting-smart-with-data/

Wagner, S., Brandt, T., & Neumann, D. (2014). Smart city planning—Developing an urban charging infrastructure for electric vehicles. En *Proceedings of the 22nd European Conference on Information Systems (ECIS 2014)*. Association for Information Systems. https://aisel.aisnet.org/ecis2014/proceedings/track08/7/

Wang, Y.-W., & Lin, C.-C. (2013). Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *58*, 76–87. https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.07.003

Weekx, S., Van den Bergh, O., & Vanhaverbeke, L. (2025). Predicting electric vehicle charging demand to support public charging infrastructure location planning. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *34*, 101639. https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101639

Wolbertus, R. (2024). Identifying factors that influence electric vehicle charging station performance in expanding networks. *PLOS ONE*, *19*(4), e0302132. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302132

Zhang, H., Moura, S. J., Hu, Z., & Song, Y. (2018). PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *9*(4), 2595–2605. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2614939

Zhang, Y., Hua, Y., Kang, A., He, J., Jia, M., & Chiang, Y.-Y. (2023). Optimal and efficient planning of charging stations for electric vehicles in urban areas: Formulation, complexity and solutions. *Expert Systems with Applications*, *230*, 120442. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120442

Zhu, J., Li, Y., Yang, J., Li, X., Zeng, S., & Chen, Y. (2017). Planning of electric vehicle charging station based on queuing theory. *The Journal of Engineering, 2017*(13), 1867–1871. https://doi.org/10.1049/joe.2017.0655

ANEXO A. DICCIONARIO DE CAMPOS Y REGLAS DE CÁLCULO DEL MODELO PI

Con el fin de facilitar la trazabilidad y reproducibilidad del Modelo Pi, este anexo recoge los principales campos utilizados durante su implementación en QGIS.

Para cada campo se indica su significado, la fórmula o regla aplicada, su función dentro del modelo y una explicación simplificada de su interpretación.

A.1 Campos comunes y viabilidad territorial

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
ID_CELDA	Identificador único de cada celda	Identificador asignado a cada celda de la malla	Permite relacionar todas las capas con la misma unidad espacial	**Es el DNI de cada cuadrado del mapa.**
SUP_VIABLE	Superficie viable dentro de la celda	Superficie clasificada como viable tras intersectar la máscara territorial	Mide qué parte de la celda puede continuar en el análisis	**Mira cuánto espacio aprovechable hay dentro del cuadrado.**
SUP_CELDA	Superficie total de la celda	Área total de la geometría	Sirve como referencia para calcular proporciones	**Es el tamaño completo del cuadrado.**
PCT_VIABLE	Porcentaje de superficie viable	$PCT_VIABLE = \frac{SUP_VIABLE}{SUP_CELDA} \cdot 100$	Expresa qué proporción de la celda supera el filtro territorial	**Dice qué porcentaje del cuadrado podemos usar.**
VIAB_CELDA	Filtro de viabilidad	1 si PCT_VIABLE > 0; 0 si PCT_VIABLE = 0	Decide si la celda continúa o queda excluida	**Si tiene aunque sea una parte viable, entra; si no tiene ninguna, sale.**
DIST_REC_M	Distancia al punto de recarga existente más próximo	Distancia espacial en metros	Permite valorar la cobertura actual	**Mide cuánto tenemos que recorrer hasta encontrar un cargador.**
DEF_COB_GEN	Déficit general de cobertura	0 hasta 250 m; crecimiento lineal 250–1.000 m; 10 desde 1.000 m	Favorece zonas más alejadas de la infraestructura existente	**Si ya tengo un cargador cerca, me falta poco; si está muy lejos, me faltan cargadores.**
DEF_COB_RES	Déficit de cobertura residencial	Misma función que DEF_COB_GEN; en QGIS se aplica a celdas viables y con demanda residencial positiva	Adapta el déficit de cobertura a la misión residencial	**Solo preguntamos si faltan cargadores donde realmente vive gente relevante para este submodelo.**
DIST_ELEC_M	Distancia al nudo eléctrico con capacidad positiva asociado	Distancia espacial en metros	Introduce la proximidad a la red con capacidad publicada	**Mide lo lejos que estamos de un punto de la red que todavía tiene capacidad.**
S_CAP_ELEC	Puntuación de capacidad eléctrica	$S_CAP_ELEC = 10\frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}$	Da mayor puntuación a nudos con mayor capacidad firme publicada	**Cuanta más electricidad disponible tenga el nudo, mejor nota recibe.**
S_PROX_ELEC	Puntuación de proximidad eléctrica	10 hasta 500 m; descenso lineal hasta 0 a 5.000 m	Valora favorablemente estar próximo al nudo	**Aunque un nudo sea bueno, es mejor si además está cerca.**
OP_ELEC	Oportunidad eléctrica preliminar	OP_ELEC = 0,50·S_CAP_ELEC + 0,50·S_PROX_ELEC	Combina capacidad publicada y proximidad	**La mejor situación es tener un buen nudo y tenerlo cerca.**

A.2 Campos del submodelo de recarga residencial compartida

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
S_POB	Población municipal normalizada	log(1 + población) y normalización 0–10	Representa la presión demográfica municipal	Más población → mayor puntuación
S_PARQ_TUR	Parque municipal de turismos normalizado	log(1 + parque de turismos) y normalización 0–10	Representa la presión asociada al parque móvil	Más turismos → mayor puntuación
DEM_RES_MUN	Presión residencial municipal	0,50·S_POB + 0,50·S_PARQ_TUR	Combina población y parque de turismos	Es la demanda municipal de partida
Est_Tur_0	Estimación de turismos con distintivo CERO	DIST_CERO·(PARQ_TUR/PARQ_TOTAL)	Aproxima los turismos CERO del municipio	Es una estimación proporcional
S_TUR_0	Electrificación municipal normalizada	log(1 + Est_Tur_0) y normalización 0–10	Introduce el grado de electrificación	Más vehículos CERO → mayor puntuación

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
DEM_RES_EV	Presión residencial electrificada	0,70·DEM_RES_MUN + 0,30·S_TUR_0	Ajusta la presión municipal por electrificación	La demanda residencial mantiene el mayor peso
S_TIP_RES	Puntuación de tipología residencial	Núcleo antiguo = 10; plurif. intensivo = 9; plurif. extensivo = 8; unif. intensivo = 4; unif. extensivo = 2	Diferencia los tejidos residenciales	Los tejidos compactos reciben mayor puntuación
ratio_sup_aparc_por_vivienda_m2	Aparcamiento registrado por vivienda	sup_aparcamiento_m2 / n_inmuebles_vivienda	Sirve de base para estimar el déficit de aparcamiento	Menor ratio → mayor necesidad potencial
NEC_AC	Déficit relativo de aparcamiento	>50 = 1; >30–50 = 3; >15–30 = 5; >5–15 = 7; >0–5 = 9; sin superficie = 10	Convierte el ratio anterior en una puntuación de necesidad	Menos aparcamiento → mayor puntuación
NEC_POND	Déficit ponderado por viviendas	NEC_AC·VIV	Pondera el déficit según el número de viviendas	Más viviendas → mayor peso
NEC_AC_RES	Déficit medio de aparcamiento residencial	ΣNEC_POND / ΣVIV	Agrega el déficit a escala residencial	Resume el déficit ponderado del ámbito

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
DEM_RES_AC	Demanda residencial inicial	(DEM_RES_EV + S_TIP_RES + NEC_AC_RES)/3	Integra los tres componentes residenciales	Combina movilidad, tejido y aparcamiento
NEC_AC_AJ	Déficit de aparcamiento ajustado	NEC_AC_RES·(S_TIP_RES/10)	Modula el déficit según la tipología residencial	Reduce su efecto en tejidos menos dependientes
DEM_RES_AC_AJ	Demanda residencial ajustada	(DEM_RES_EV + S_TIP_RES + NEC_AC_AJ)/3	Recalcula la demanda con el déficit ajustado	Es la demanda utilizada antes de pasar a la malla
AREA_FRAG	Superficie del fragmento residencial	Área geométrica del fragmento	Permite ponderar los fragmentos por superficie	Mide cuánto ocupa cada fragmento
AREA_RES_AJ	Superficie residencial válida	AREA_FRAG si existe demanda válida; si no, 0	Identifica la superficie que participa en la agregación	Excluye fragmentos sin demanda válida
POND_RES_AJ	Demanda ponderada por superficie	DEM_RES_AC_AJ·AREA_RES_AJ	Pondera la demanda según la superficie ocupada	Los fragmentos mayores tienen más peso

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
DEM_RES_MED_AJ	Demanda residencial media de la celda	ΣPOND_RES_AJ / ΣAREA_RES_AJ	Agrega la demanda residencial en la malla	Obtiene la intensidad media de cada celda
COB_RES_AJ	Proporción residencial de la celda	ΣAREA_RES_AJ / SUP_CELDA	Mide cuánto de la celda es residencial	Menor presencia residencial → menor ajuste
DEM_RES_LOCAL_AJ	Demanda residencial local ajustada	DEM_RES_MED_AJ·COB_RES_AJ	Constituye la demanda final del submodelo	Combina intensidad y presencia residencial
PRI_ZONA_RES_AJ	Prioridad final residencial	Si VIAB_CELDA = 1 y hay demanda: DEM_RES_LOCAL_AJ·(0,50 + 0,30·DEF_COB_RES/10 + 0,20·OP_ELEC/10); si no = 0	Genera la prioridad final de la misión residencial	Demanda como base; cobertura y red la ajustan

A.3 Campos del submodelo de recarga de destino y oportunidad

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
PESO_DEST_sum	Suma de los pesos de los puntos de interés de destino presentes en la celda.	Suma espacial de los pesos asignados a los POI contenidos en cada unidad espacial.	Representa la concentración bruta de actividades y equipamientos capaces de atraer desplazamientos.	Es un campo intermedio. Como suele presentar una distribución muy asimétrica, primero se transforma y normaliza para obtener S_POI_DEST.
S_POI_DEST	Intensidad relativa de puntos de interés asociados a la demanda de destino.	Normalización 0–10 de log(1 + PESO_DEST_sum).	Constituye la componente espacial estructurante de la demanda local de destino.	Valores altos indican celdas con mayor concentración relativa de actividades y equipamientos capaces de generar estancia.
DEM_DEST_MUN	Presión municipal de turismo y destino.	Combinación de la capacidad alojativa municipal normalizada y el turismo receptor municipal normalizado, según la ponderación definida en la metodología.	Ajusta la intensidad local de destino según la presión turística del municipio.	No localiza por sí sola la demanda dentro del municipio. Se incorpora como modulador de S_POI_DEST.
MUN_DEM_DEST_MUN	Campo de la capa de trabajo que contiene el valor municipal DEM_DEST_MUN transferido a cada celda.	Unión espacial/atributiva del valor DEM_DEST_MUN del municipio correspondiente.	Permite utilizar la presión municipal en el cálculo a escala de malla.	Es el nombre del campo observado en la capa final de QGIS; conceptualmente representa DEM_DEST_MUN.
DEM_DEST_LOCAL	Demanda local relativa de recarga de destino.	DEM_DEST_LOCAL = S_POI_DEST × (0,50 + 0,50 × DEM_DEST_MUN / 10)	Es la demanda estructurante del submodelo de destino.	S_POI_DEST localiza la actividad y DEM_DEST_MUN modula su intensidad. El término 0,50 conserva demanda de destinos no exclusivamente turísticos.
ID_POI_count	Número de aparcamientos identificados en la celda para construir la oportunidad funcional.	Conteo espacial de aparcamientos presentes en la unidad espacial.	Sirve de campo auxiliar para calcular S_PARK_DEST.	El campo de conteo procede de la unión espacial. No entra directamente en la prioridad final.
S_PARK_DEST	Puntuación de oportunidad funcional asociada a la presencia de aparcamientos.	0 aparcamientos → 0; 1 → 5; 2 → 7,5; 3 o más → 10.	Representa el principal componente de OP_DEST.	Se da más peso al aparcamiento porque la misión de destino supone que el vehículo permanece estacionado durante otra actividad.
fid_count	Número de estaciones de servicio identificadas en la celda.	Conteo espacial de estaciones de servicio presentes en la unidad espacial.	Campo auxiliar utilizado para construir S_GAS_DEST.	El nombre procede de la operación de conteo/unión espacial en QGIS. No se utiliza directamente en la fórmula final.

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
S_GAS_DEST	Puntuación de oportunidad funcional asociada a estaciones de servicio.	Si existe al menos una estación de servicio → 10; si no existe ninguna → 0.	Actúa como componente complementario de OP_DEST.	Es un indicador binario de presencia. No mide número de surtidores, potencia disponible ni capacidad real para instalar recarga.
OP_DEST	Oportunidad funcional de destino.	OP_DEST = 0,70 × S_PARK_DEST + 0,30 × S_GAS_DEST	Ajusta la prioridad de destino según la existencia de emplazamientos funcionalmente compatibles con la recarga.	Se mantiene separado de DEM_DEST_LOCAL: la oportunidad funcional no genera demanda por sí sola.
PRI_ZONA_DEST	Prioridad final relativa del submodelo de destino y oportunidad.	Si VIAB_CELDA = 1 y DEM_DEST_LOCAL > 0: PRI_ZONA_DEST = DEM_DEST_LOCAL × (0,45 + 0,20 × DEF_COB_GEN/10 + 0,20 × OP_ELEC/10 + 0,15 × OP_DEST/10). En caso contrario = 0.	Es el output final del submodelo de destino.	La demanda es la base. El déficit de cobertura, la oportunidad eléctrica y OP_DEST solo modifican una demanda previamente identificada. No representa una ubicación definitiva.

A.4 Campos del submodelo de recarga en corredores interurbanos

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
S_OD_CORR	Intensidad relativa del corredor origen-destino.	S_OD_CORR = 10·VIAJES_CORR / max(VIAJES_CORR)	Normaliza el volumen de desplazamientos de cada corredor entre 0 y 10.	El corredor con más viajes recibe 10 y los demás se valoran en relación con él.
S_OD_CORR_max	Mayor intensidad de corredor asociada a la celda.	Máximo S_OD_CORR de los corredores que afectan a la celda.	Evita sumar artificialmente demanda cuando varios corredores se superponen.	Si pasan dos corredores por una celda, se conserva únicamente el de mayor intensidad.
DEM_RUTA	Demanda relativa de recarga en ruta.	DEM_RUTA = S_OD_CORR_max; 0 cuando la celda no está afectada por ningún corredor.	Constituye la demanda estructurante del submodelo interurbano.	Indica la intensidad relativa de movilidad interurbana asociada a cada celda.
fid_count	Número de estaciones de servicio identificadas en la celda.	Conteo espacial de estaciones de servicio presentes en la unidad espacial.	Campo auxiliar utilizado para construir S_GAS_RUTA.	Permite saber si existe una estación de servicio dentro de la unidad espacial.
S_GAS_RUTA	Oportunidad funcional asociada a estaciones de servicio.	Si existe al menos una estación de servicio → 10; si no existe ninguna → 0.	Introduce la presencia de espacios funcionalmente vinculados a la movilidad viaria.	Una estación de servicio mejora la oportunidad, pero no genera demanda por sí sola.
PRI_ZONA_RUTA	Prioridad inicial asociada al corredor.	Si VIAB_CELDA = 1 y DEM_RUTA > 0: PRI_ZONA_RUTA = DEM_RUTA × (0,45 + 0,20·DEF_COB_GEN/10 + 0,20·OP_ELEC/10 + 0,15·S_GAS_RUTA/10). En caso contrario = 0.	Integra demanda, cobertura, oportunidad eléctrica y estaciones de servicio.	Es una prioridad inicial antes de diferenciar entre zonas urbanas e interurbanas.

Campo	Qué significa	Fórmula / regla	Qué hace dentro del modelo	Explicación
S_INTERURB	Carácter interurbano de la celda.	Dentro de núcleo = 0; fuera del núcleo pero dentro del buffer de 500 m = 5; fuera del buffer = 10.	Penaliza los sectores urbanos y favorece los tramos claramente interurbanos.	Una celda urbana se anula, una de transición conserva el 50 % y una interurbana el 100 %.
PRI_RUTA_AJ	Prioridad final ajustada de corredores interurbanos.	PRI_RUTA_AJ = PRI_ZONA_RUTA · S_INTERURB / 10	Es el output final del submodelo de corredores.	Ajusta la prioridad inicial para que la misión represente realmente la recarga en ruta.