



Ciencia para
las Políticas
Públicas

¿Cómo evitar el colapso de las ciudades?

Hacia un modelo de movilidad urbana sostenible

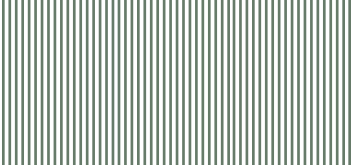
Coordinado por:

Ana Arenillas • Diego Ramiro • Isabel Suelves • Jorge Villagra



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



SCIENCE  POLICY

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional [CC BY 4.0].
Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> [correo: editorialcsic@csic.es]



Departamento de Comunicación
Gabinete de Presidencia
CSIC, Calle Serrano 117
28006 Madrid
Correo: science4policy@csic.es

NIPO: 155-26-005-1
e-NIPO: 155-26-006-7
Depósito legal: M-4877-2026

Edición no venal

Coordinado en el marco de PTI Mobility 2030 por:

Ana Arenillas
Diego Ramiro
Isabel Suelves
Jorge Villagra

Colaboradores:

Fulvio Amato
Filippo Bistaffa
Ignacio Cameán
Javier Carretero
Fernando Martín Consuegra
Félix Antonio López
Teresa Moreno
Miguel A. Peña
Jose Luis Pinilla
Jose Javier Ramasco

Coordinadores de la colección Ciencia para las Políticas Públicas:

Jorge Hernández-Moreno
Cindy Matos Ramos

Edición:

Marta García Gonzalo
Caja Alta Edición y Comunicación

Ilustraciones:

Freepress Coop

Diseño y maquetación:

David Pamplona Roche

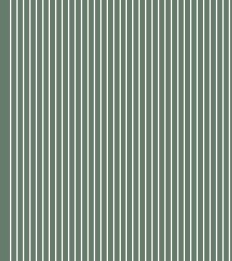
Como citar este informe: Arenillas, A., Ramiro, D., Suelves, I., & Villagra, J. [2026]. *¿Cómo evitar el colapso de las ciudades? hacia un modelo de movilidad urbana sostenible*. CSIC.

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



El CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su estatuto. Enmarcado en esta función, el informe *¿Cómo evitar el colapso de las ciudades? hacia un modelo de movilidad urbana sostenible*, de la colección Ciencia para las Políticas Públicas, se presenta como un documento dirigido a administraciones y a la sociedad en general. Muestra como la movilidad urbana supone uno de los grandes retos de las ciudades de hoy y del mañana, con implicaciones sociales, económicas, medioambientales y de salud pública. Avanzar hacia una movilidad realmente sostenible requiere un enfoque integral que combine tecnologías más limpias y sostenibles, políticas públicas que incentiven un nuevo diseño de transporte público y movilidad activa, así como herramientas de análisis que permitan anticipar y optimizar el impacto de dichas intervenciones. El CSIC ofrece evidencias y tecnologías que permiten abordar estos retos de forma más eficaz, inclusiva y resiliente.

ÍNDICE

uno

Fundamentos y desafíos

- 1.1. Introducción: el reto de la movilidad urbana sostenible
- 1.2. Los principales desafíos, consecuencias y efectos de la movilidad urbana

dos

El papel del CSIC en la transformación de la movilidad urbana

- 2.1. Liderazgo institucional en la generación de capacidades técnicas y el procesamiento de datos
- 2.2. Promoción de la investigación a nivel urbano y de la reconfiguración de los espacios públicos
- 2.3. Actuaciones clave en el desarrollo de tecnologías que vinculan la movilidad urbana y la salud
- 2.4. Impulso de la movilidad inteligente en escenarios reales y complejos
- 2.5. Desarrollo de tecnologías energéticas y materiales avanzados para una movilidad sostenible

tres

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

Listado de centros

cinco

Para saber más



uno



Fundamentos y desafíos

La presente sección ofrece una visión general de los principales desafíos y transformaciones que enfrenta la movilidad urbana en el contexto actual. Se examinan las tendencias, los efectos y los riesgos asociados al modelo vigente, así como los avances recientes hacia un sistema más sostenible, equitativo y resiliente.



11.

Introducción: el reto de la movilidad urbana sostenible

LA movilidad urbana constituye uno de los principales desafíos estructurales de las ciudades del siglo XXI. Su papel va mucho más allá del simple desplazamiento; se trata de una cuestión con implicaciones directas sobre la salud pública, la equidad social, la sostenibilidad ambiental, la cohesión territorial y el acceso efectivo a derechos fundamentales como el trabajo, la educación o la atención médica. El modelo predominante, basado en una elevada dependencia del automóvil privado y en un urbanismo disperso, ha alcanzado sus límites funcionales y ecológicos. La congestión crónica, la contaminación atmosférica y acústica, la ocupación excesiva del espacio público y la baja eficiencia energética del sistema actual reflejan una crisis que ya no puede abordarse con soluciones parciales.

El problema no es nuevo, pero se ha intensificado en los últimos años debido a una combinación de factores. La expansión acelerada de las áreas urbanas, muchas veces carente de una planificación integrada del transporte, ha generado un crecimiento desigual del acceso a servicios y oportunidades. Al mismo tiempo, el aumento del uso individualizado del coche ha provocado un desequilibrio en el uso del espacio urbano, marginando modos sostenibles como el transporte público, la bicicleta o el desplazamiento peatonal. Como consecuencia de todo ello, se consolidan patrones de movilidad que refuerzan las desigualdades sociales existentes, resultan ambientalmente insostenibles y afectan de forma especial a los sectores más vulnerables de la población.

Esta situación se ve agravada por transformaciones globales que reconfiguran profundamente el entorno urbano. La digitalización de los servicios, el envejecimiento poblacional y, sobre todo, el cambio climático exigen una nueva manera de pensar la movilidad. Asegurar que los desplazamientos urbanos resulten saludables, equitativos, eficientes y con bajas emisiones de carbono es hoy más necesario que nunca. Para lograrlo, se precisan cambios profundos en las infraestructuras físicas, en los marcos regulatorios, en los modelos de gobernanza y, en especial, en los hábitos sociales y culturales que sostienen el sistema actual.

El contexto pos-COVID-19 ha reforzado esta urgencia. La pandemia no solo alteró las pautas de movilidad con el auge del teletrabajo, el incremento del comercio electrónico y el aumento de las formas de micromovilidad, sino que evidenció la fragilidad de los sistemas urbanos ante disrupciones externas. También abrió una ventana de oportunidad para repensar el espacio urbano. Muchas urbes pusieron en marcha medidas temporales como nuevos carriles bici, calles peatonales o restricciones al tráfico que demostraron que otro modelo de ciudad es posible. Aunque alentadoras, muchas de estas iniciativas siguen siendo actuaciones puntuales o poco consolidadas, por lo que es preciso que se conviertan en políticas duraderas.

Mientras tanto, los sistemas de transporte deben responder a la demanda creciente de sostenibilidad, eficiencia y accesibilidad. La ciudadanía muestra una sensibilidad cada vez mayor frente a los impactos ambientales del tráfico, la inequidad en el acceso a la movilidad y la calidad del aire urbano. Esta presión se enmarca, además, en compromisos internacionales como el Acuerdo de París, la Agenda 2030 o la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Unión Europea (UE), que establecen metas ambiciosas de reducción de emisiones y transformación urbana. En este nuevo escenario, las tecnologías emergentes, como la electromovilidad, la digitalización del transporte o las plataformas integradas de movilidad, abren nuevas posibilidades, pero también requieren una gobernanza pública sólida para asegurar que estas innovaciones contribuyan realmente a una movilidad más justa y sostenible para todos.

El problema de fondo posee una dimensión social ineludible. La movilidad no es un fin en sí mismo, sino un medio para acceder a los bienes y los servicios que estructuran la vida cotidiana. Cuando este acceso está mediado por un sistema excluyente o ineficiente, se generan barreras que restringen el ejercicio de derechos fundamentales y amplifican desigualdades ya existentes. Las periferias urbanas, los entornos rurales, las personas mayores, los jóvenes o quienes viven con movilidad reducida encuentran a menudo limitaciones significativas para desplazarse de forma autónoma, segura y digna. La falta de transporte público de calidad, la inseguridad vial o la ausencia de infraestructuras accesibles configuran un mapa desigual de oportunidades. En

este sentido, la movilidad puede reforzar o corregir desigualdades estructurales, dependiendo de cómo se diseñe, se regule y se implemente.

Por ello, resulta imprescindible situar la movilidad urbana sostenible en el centro de las agendas públicas, tanto a nivel local como nacional y europeo. No se trata solo de reducir emisiones o mejorar la eficiencia del tráfico, sino de transformar las prioridades urbanas para construir ciudades más inclusivas, preparadas para futuras crisis y pensadas para el bienestar común. Para lograrlo, se requiere una planificación intersectorial que articule las políticas de movilidad con las de urbanismo, energía, medioambiente y salud. Esta integración debe reflejarse en marcos normativos claros, instrumentos financieros adecuados, incentivos coherentes y una gobernanza colaborativa que involucre a actores públicos y privados, operadores tecnológicos, organizaciones sociales y a la ciudadanía.

Transformar el sistema de movilidad urbana no es una opción, sino una necesidad. La inacción no solo perpetuaría los problemas actuales, sino que agravaría las tensiones sociales, económicas y ecológicas de nuestras urbes. También supondría perder la ocasión de construir entornos más saludables, sostenibles y cohesionados. Aprovechar estas oportunidades requiere visión estratégica, respaldo institucional y un compromiso sostenido con la mejora del bienestar colectivo. El alcance de los beneficios dependerá de la capacidad de traducir diagnósticos sólidos en políticas coherentes y sostenibles a medio y largo plazo.

En este marco, la movilidad urbana, como sistema que articula la vida cotidiana, ha dejado de ser un asunto sectorial para convertirse en un factor clave vinculado estrechamente con los principales desafíos del siglo XXI: el cambio climático, la transición energética, la inclusión social, la salud pública, la cohesión territorial y el desarrollo sostenible de las ciudades. Para comprender a fondo estos retos, no basta con analizar indicadores de tráfico o planificar nuevas infraestructuras: es necesario adoptar una mirada amplia, interconectada y respaldada por evidencias científicas, que permita entender cómo se relaciona la movilidad con las dinámicas sociales, los modelos de ciudad y los cambios tecnológicos en marcha.

Así, con el fin de avanzar hacia ese modelo transformador, resulta preciso clarificar, en primer lugar, qué entendemos por *movilidad urbana sostenible* y cuáles son los principios que deben guiarla.

Apuntes conceptuales básicos

El concepto de *movilidad urbana sostenible* ha evolucionado desde una definición centrada en la eficiencia y la reducción de emisiones hacia una visión más amplia e integradora. Hoy se entiende como un sistema de transporte que garantiza el derecho universal a desplazarse con medios accesibles, limpios, eficientes y bien conectados, que reduzcan los impactos ambientales, favorezcan un espacio público más habitable y contribuyan a una vida urbana más saludable y equitativa.

Esta visión se construye sobre cuatro pilares fundamentales. La **accesibilidad** implica que todas las personas, sin importar edad, género, condición física o nivel socioeconómico, puedan acceder de manera segura y asequible a las oportunidades que ofrece la urbe. La **sostenibilidad ambiental** se relaciona con la reducción de emisiones, el uso de energías limpias y la mejora de la calidad ambiental. La **eficiencia** busca un uso racional del tiempo, la energía y el espacio urbano. Y la **integración** se refiere a la conexión fluida entre diferentes modos de transporte, escalas territoriales y herramientas digitales.

Vinculado a estos pilares, el vocabulario en torno a la movilidad sostenible ha ido incorporando términos clave. La *electromovilidad* se refiere al uso de vehículos eléctricos, elemento central en los esfuerzos de descarbonización del transporte. La *micromovilidad* agrupa medios ligeros y de baja velocidad, como bicicletas, patinetes o vehículos compartidos. La *intermodalidad* describe la combinación fluida de varios modos de transporte en un mismo trayecto, reduciendo así la dependencia del coche privado. Y la *movilidad activa*, como caminar o pedalear, no solo es sostenible, sino que también promueve la salud, la equidad y el dinamismo urbano.

Además, la digitalización ha dado lugar al concepto de *movilidad inteligente*, basado en tecnologías como la inteligencia artificial, el análisis de datos o las plataformas digitales. Estas herramientas permiten gestionar el tráfico con mayor eficiencia, ofrecer una mejor información al usuario y facilitar el acceso a soluciones integradas de movilidad como servicio (MaaS), que combinan distintos modos en una única plataforma de planificación, reserva y pago.

En cuanto a los tipos de transporte urbano, el panorama actual es diverso: incluye el transporte público (autobuses, metro, tranvía, trenes de cercanías), el transporte privado (coches y motos particulares), la movilidad compartida (*carsharing*, *bikesharing*, viajes compartidos), los modos individuales no motorizados (peatones, bicicletas) y, en fase emergente, los vehículos autónomos que podrían transformar la forma en la que se organiza y regula el conjunto del sistema. Sin embargo, esta diversidad no siempre se traduce en opciones reales para la población, debido a barreras de acceso, falta de coordinación entre servicios o desigualdades territoriales y digitales.

En síntesis, una movilidad urbana sostenible es aquella que, al ser accesible, limpia, integrada y eficiente, contribuye a construir ciudades más inclusivas, habitables y preparadas para el futuro. Alcanzar esta visión requiere tanto cambios estructurales como transformaciones culturales, institucionales y tecnológicas, que se explorarán en el apartado siguiente.

Orígenes estructurales del modelo actual

En la actualidad, el modelo de movilidad predominante en muchas urbes españolas y europeas responde a una lógica de desarrollo urbano que, durante décadas, priorizó el uso del automóvil privado como símbolo de progreso y libertad individual. Esta preferencia determinó la configuración del espacio urbano: la expansión de las periferias residenciales, la segregación funcional urbana (vivienda, trabajo, consumo) y la construcción de redes viarias pensadas para el tráfico motorizado. Todo ello contribuyó a consolidar un modelo disperso, ineficiente y poco equitativo.

Figura 1 Los cuatro pilares de la movilidad urbana sostenible



Según datos del Observatorio de la Movilidad Metropolitana, correspondientes al periodo 2019-2022, los desplazamientos diarios en áreas metropolitanas españolas superan los 30 minutos de media y presentan una marcada predominancia del coche particular. Este patrón contrasta con el de varias ciudades europeas —como Ámsterdam, Viena o Copenhague— que, pese a su tamaño, han priorizado modelos urbanos más compactos y sostenibles, reduciendo la dependencia del vehículo privado y mejorando las condiciones para la movilidad activa y el transporte público.

Las infraestructuras desarrolladas en este contexto muestran una integración aún limitada entre distintos modos de transporte. La conexión entre el transporte público, la bicicleta y los trayectos a pie sigue siendo poco fluida, debido a la escasez de nodos intermodales bien planificados, a la falta de continuidad en las

redes ciclistas y a la débil coordinación tarifaria y operativa. Esta fragmentación no solo reduce la eficiencia del sistema, sino que también agrava las desigualdades de acceso. Según el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (MITMA, 2025) —a partir de datos del informe de ECODES (2024)— entre 1 y 6,7 millones de personas en España enfrentan lo que se ha denominado *pobreza de transporte*, es decir, dificultades para acceder a opciones adecuadas, tiempos de viaje excesivos o carencia de alternativas viables. Estas barreras afectan especialmente a quienes deben combinar varios medios para sus desplazamientos cotidianos, lo que desincentiva el uso de formas de movilidad sostenibles y refuerza la dependencia del coche privado.

Además, aunque se han dado algunos pasos hacia una movilidad más limpia, la falta de normas homogéneas y suficientemente estrictas para controlar los impactos ambientales y sociales del transporte ha permitido que persistan prácticas contaminantes en muchas urbes. Un ejemplo de ello es la aplicación desigual de las zonas de bajas emisiones (ZBE): desde 2023, su implantación es obligatoria en municipios de más de 50 000 habitantes, pero aún existe una gran heterogeneidad en su implementación y vigilancia. En consecuencia, las emisiones derivadas del tráfico rodado siguen constituyendo la principal fuente de dióxido de nitrógeno (NO₂) en entornos urbanos y, de hecho, en varios núcleos alcanzan niveles que superan los límites legales establecidos por la UE.

Otro factor crítico es el insuficiente apoyo al transporte público y a los modos activos. Mientras que la financiación destinada a carreteras se ha mantenido estable o incluso ha aumentado, la inversión en redes de transporte público ha sido intermitente y, en muchos casos, insuficiente. Según el Victoria Transport Policy Institute —centro independiente de investigación con sede en Canadá, especializado en el análisis de políticas de transporte y movilidad sostenible—, en ciudades norteamericanas y comunidades urbanas comparables los automóviles concentran la mayor parte de la inversión pública en infraestructuras y servicios, mientras que los modos no motorizados (como caminar o ir en bicicleta) y el transporte público reciben menos del 20 % del gasto

total en movilidad. En línea con esto, organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y el Foro Internacional del Transporte (ITF) han subrayado que, para avanzar hacia una movilidad verdaderamente sostenible, resulta imprescindible redirigir la financiación hacia el transporte público y los modos activos, dejando atrás el enfoque tradicional centrado en las infraestructuras viarias.

A lo anterior se suma una coordinación institucional limitada. La coexistencia de múltiples niveles de gobierno (local, autonómico y estatal) y la ausencia de autoridades metropolitanas de transporte eficaces han dado lugar a estrategias fragmentadas y, a menudo, contradictorias. Esta falta de integración dificulta la planificación conjunta, tanto técnica como financiera. Según un informe del Banco Europeo de Inversiones (BEI) sobre el apoyo al transporte público urbano en la Unión Europea (2007-2019), esta debilidad institucional constituye uno de los principales obstáculos para avanzar hacia una movilidad más sostenible.

Por último, la adopción de tecnologías limpias sigue siendo insuficiente. Aunque los vehículos eléctricos han ganado algo de terreno, solo representaron el 5,4 % de las nuevas matriculaciones en España en 2023, muy por debajo de la media europea. Las razones incluyen tanto el coste como la escasa infraestructura de recarga fuera de las grandes ciudades. Asimismo, la digitalización de la gestión del transporte urbano progresa de manera desigual, por lo que pocas cuentan con sistemas integrados de gestión de flotas, señalización adaptativa o análisis de datos en tiempo real.

En conjunto, estos factores configuran un sistema de movilidad con disfunciones estructurales profundas, cuya transformación solo será posible si se actúa de manera coordinada y con una visión a largo plazo.

12.

Los principales desafíos, consecuencias y efectos de la movilidad urbana

LA movilidad urbana constituye un componente esencial del funcionamiento de las ciudades y un factor decisivo para su sostenibilidad futura. Su configuración actual plantea importantes desafíos en los planos ambiental, social y económico, que inciden directamente en la calidad de vida de la población y en la competitividad de los territorios. Este apartado examina los principales efectos y tendencias de dicho modelo, así como las brechas y riesgos que condicionan su transformación hacia sistemas de transporte más sostenibles y equitativos.

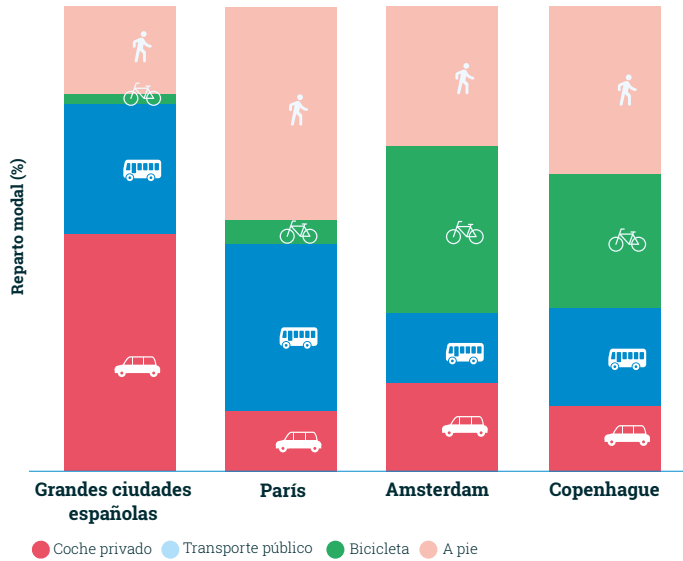
Algunos datos, tendencias y brechas

La evidencia empírica pone de manifiesto tendencias que refuerzan el diagnóstico de que el modelo de movilidad urbana vigente resulta insostenible. En España, cerca del 60 % de los desplazamientos en zonas urbanas se realizan en coche, frente a menos del 30 % que se efectúan en transporte público, según datos del MITMA y el Instituto Nacional de Estadística (INE) correspondientes al periodo 2019-2022. Además, el tiempo medio de viaje en transporte colectivo supera los 45 minutos, casi el doble del que se registra en vehículo privado. Aunque, en ciudades como Madrid o Barcelona, el transporte público alcanza cuotas de uso cercanas al 40 % en días laborables, el automóvil sigue siendo el modo dominante en sus áreas metropolitanas.

Esta dinámica no solo pone en cuestión la sostenibilidad ambiental, sino también la eficiencia del sistema y su equidad. En municipios de menos de 50 000 habitantes, más del 70 % de los desplazamientos se realizan exclusivamente en coche, mientras que la frecuencia del transporte público no suele superar los 2 o 3 servicios diarios. Esto genera una fuerte dependencia del vehículo privado y penaliza a los sectores sin acceso a él. Además, según estudios recientes, los hogares con menor renta destinan hasta un 20 % de sus ingresos al transporte, frente a un 10 % en los de mayores recursos, lo que acentúa su carácter regresivo.

Figura 2 Reparto modal del transporte en España e inversión en movilidad urbana

Comparativa internacional del reparto modal urbano



Desde una perspectiva comparada, España invierte cada año unos 95 euros por habitante en movilidad urbana, una cifra sensiblemente inferior a la que destinan países como Francia, Alemania o los Países Bajos, donde las inversiones superan los 200 euros per cápita en muchas urbes. Estas diferencias se reflejan en la infraestructura disponible: por ejemplo, la densidad media de carriles bici en las grandes ciudades españolas apenas alcanza los 0,3 kilómetros por kilómetro cuadrado, frente a los más de 1,2 en capitales del norte de Europa como Ámsterdam, Berlín o París.

Si bien algunas urbes han impulsado políticas prometedoras, como la ampliación de redes ciclistas, la peatonalización de centros históricos o la implantación de zonas de bajas emisiones, muchas de estas iniciativas carecen de continuidad, se ven interrumpidas por cambios políticos o no cuentan con financiación suficiente para mantenerse en el tiempo. Además, la falta de mecanismos sólidos de evaluación limita la posibilidad de medir su impacto real en la transformación de los patrones de movilidad.

Implicaciones ambientales, sociales y económicas

Los efectos del modelo de movilidad actual son amplios y acumulativos con el tiempo. En el ámbito ambiental, el transporte urbano es responsable de una parte sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el transporte representa aproximadamente el 25 % de las emisiones totales de la UE, de las cuales una proporción significativa se origina en el tráfico urbano. Además, las emisiones de dióxido de nitrógeno y de partículas en suspensión asociadas al tráfico rodado contribuyen de forma directa al deterioro de la calidad del aire. En ciudades como Madrid o Barcelona, estos niveles continúan superando de forma regular los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

Estas condiciones tienen un impacto directo en la salud. Diversos estudios científicos han demostrado la correlación entre la exposición prolongada a los contaminantes del tráfico y el aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas. Según el Instituto de Salud Carlos III, se estima que cerca de 30 000 muertes prematuras al año en España pueden atribuirse a la mala calidad del aire, particularmente en entornos urbanos. Asimismo, la escasa actividad física asociada a modelos de movilidad centrados en el coche privado contribuye al sedentarismo, un factor de riesgo relevante en patologías crónicas como la diabetes o las enfermedades coronarias.

Las consecuencias sociales también resultan significativas. La falta de acceso a un sistema de transporte eficiente limita la inserción laboral, el acceso a servicios básicos y la participación social. La movilidad forzada, aquella que obliga a recorrer largas distancias debido a la desconexión entre el lugar de residencia y



las oportunidades vitales, afecta de modo especial a mujeres, jóvenes, personas mayores y miembros de hogares de rentas bajas, perpetuando las desigualdades ya existentes.

Desde el punto de vista económico, los costes derivados de la congestión, los accidentes de tráfico, el mantenimiento de infraestructuras sobredimensionadas y la dependencia de combustibles fósiles son considerables. Según un informe del Banco Mundial, el coste de la congestión urbana puede alcanzar entre el 2 % y el 4 % del producto interior bruto (PIB) anual en las grandes urbes, al considerar tanto la pérdida de productividad como los impactos indirectos sobre la salud y el medioambiente. Esta situación también perjudica la capacidad de las ciudades para funcionar de forma ágil y competitiva como espacios de desarrollo económico.

En suma, las consecuencias del modelo actual de movilidad urbana no solo afectan al transporte, sino que limitan también la capacidad de las urbes para ofrecer entornos más sanos, equitativos y sostenibles para quienes las habitan.

Riesgos emergentes y coste de la inacción

A medida que se despliegan políticas y tecnologías orientadas a una movilidad más sostenible, también surgen riesgos que podrían comprometer sus objetivos si no se abordan con una mirada crítica y de largo plazo. Uno de los más relevantes es la posibilidad de una transición superficial, en la que se sustituya el coche térmico por el eléctrico sin modificar el modelo urbano basado en la dispersión territorial, la dependencia del vehículo privado y el uso intensivo del espacio público para el tráfico motorizado.

Además, la producción y el uso de vehículos eléctricos plantean importantes desafíos geopolíticos y de sostenibilidad. La extracción de minerales estratégicos como el litio, el cobalto o las tierras raras, necesarios para las baterías, tiene efectos significativos en los ecosistemas y las comunidades de los países proveedores y refuerza dependencias económicas que pueden resultar tan problemáticas como las que hoy impone el petróleo. A ello se suma la escasa implantación de cadenas de reciclaje efectivas y la gestión aún deficiente de las baterías al final de su vida útil, factores que condicionan la viabilidad del modelo.

Constituye otro riesgo la expansión desigual de las soluciones digitales. Aunque plataformas como las de MaaS y los sistemas inteligentes pueden mejorar la eficiencia y la accesibilidad del transporte, también existe el riesgo de que acentúen las desigualdades si no se garantiza un acceso universal. La brecha digital, la falta de transparencia de los algoritmos y el uso comercial de los datos personales plantean dilemas éticos y de gobernanza que deben abordarse desde el diseño mismo de estas tecnologías.

Desde el punto de vista institucional, la fragmentación en la toma de decisiones, la limitada capacidad técnica de muchos municipios y la falta de coordinación intergubernamental dificultan una planificación y una ejecución coherentes de políticas integradas. La presencia de múltiples actores sin mecanismos de concertación sólidos genera ineficiencias y puede neutralizar los avances logrados. El riesgo no es solo técnico, sino también político: sin un liderazgo claro y una cooperación estructurada, las oportunidades de innovación tienden a diluirse.

Por último, persiste un reto cultural de gran calado. Las transiciones sostenibles exigen transformaciones en los hábitos cotidianos, en las aspiraciones de movilidad y en las percepciones de seguridad, confort y estatus asociadas al coche privado. Sin políticas educativas, campañas de sensibilización y procesos participativos que acompañen el cambio, las resistencias sociales pueden socavar el éxito de las políticas públicas más ambiciosas.

En definitiva, la ausencia de una intervención decidida frente a los desafíos de la movilidad urbana conlleva costes crecientes que comprometen no solo la sostenibilidad del sistema de transporte, sino también la viabilidad del modelo urbano en su conjunto.

Desde la perspectiva ambiental, la inacción dificulta el cumplimiento de los compromisos climáticos asumidos en el marco del Acuerdo de París y la Agenda 2030. Si las ciudades continúan creciendo sin transformaciones estructurales, las emisiones derivadas del transporte urbano seguirán aumentando, alejando los objetivos de neutralidad climática.

Por otro lado, en el ámbito social, el mantenimiento de un modelo basado en el vehículo privado refuerza las desigualdades en el acceso a la urbe. La limitada disponibilidad de transporte público en muchos territorios, junto con la exclusión digital y económica, reduce de manera significativa las posibilidades de acceder en condiciones equitativas a servicios esenciales y oportunidades laborales. Las personas con menos recursos, que suelen residir en las zonas más expuestas a la contaminación y con peor conectividad, afrontan un doble inconveniente: sufren los efectos negativos del modelo sin beneficiarse por completo de sus ventajas.

Asimismo, en términos económicos, los costes asociados a la congestión, la siniestralidad vial, la ineficiencia energética y el deterioro de la salud pública resultan significativos. A estos se suman las oportunidades perdidas como consecuencia de la lentitud en adoptar tecnologías limpias o en transformar el sector del transporte, que limitan la capacidad de competir en cadenas de valor globales y frenan la creación de empleo verde.

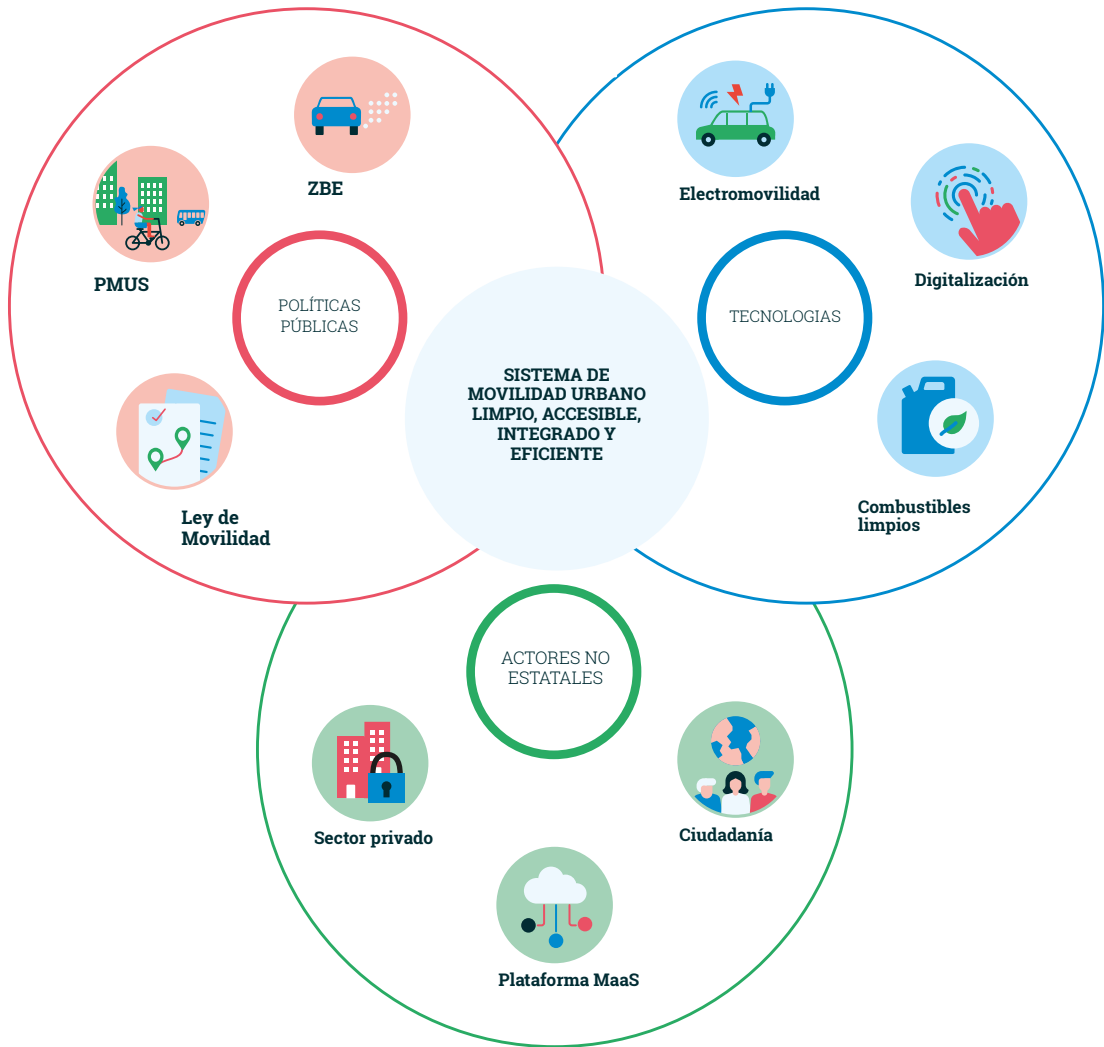
A todo ello se añade un impacto menos cuantificable pero igualmente crítico: el progresivo deterioro de la calidad de vida en las ciudades. Entornos saturados de tráfico, ruido y contaminación pierden atractivo como espacios para vivir, trabajar o innovar. Este modelo no solo genera costes tangibles, sino que debilita el capital social, reduce la interacción comunitaria y afecta de manera negativa la salud física y mental de la población.

En este contexto, tomar una postura pasiva frente a los desafíos de la movilidad urbana equivale a prolongar un sistema que ya muestra claros signos de agotamiento. Esto limita la posibilidad de construir urbes más equitativas, saludables y resilientes. Para avanzar hacia una movilidad verdaderamente sostenible, se hace necesario asumir el reto de transformar, aun cuando ello conlleve un elevado grado de complejidad e incertidumbre.

Avances y límites en la transformación de la movilidad

En los últimos años, el debate sobre la movilidad urbana ha empezado a traducirse en medidas concretas impulsadas tanto desde el ámbito público como desde la iniciativa privada y la sociedad civil. No obstante, el alcance real de estas intervenciones sigue resultando desigual y a menudo se ve limitado por las barreras estructurales, las resistencias sociales y la falta de evaluación sistemática. Este apartado examina las principales líneas de acción actuales en tres ámbitos clave: las políticas públicas, las tecnologías descarbonizadoras y el papel emergente de los actores privados y los ciudadanos.

Figura 3 Palancas para transformar la movilidad urbana



En el plano institucional, las Administraciones públicas han comenzado a consolidar una arquitectura normativa que refuerza el compromiso con la movilidad sostenible. Más allá de las zonas de bajas emisiones, que ya han sido analizadas, destacan medidas como los Planes de Movilidad Urbana Sostenible, financiados a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Estos representan una oportunidad para una planificación más integrada y participativa, aunque su implementación efectiva todavía resulta desigual.

En paralelo, la futura ley de movilidad sostenible, actualmente en tramitación, busca dotar de coherencia jurídica y financiera a estas estrategias, promoviendo la coordinación interadministrativa y garantizando el acceso equitativo a los sistemas de transporte. A ello se suman programas como el Plan MOVES, cofinanciado por el Gobierno de España y la UE, que ha impulsado la adquisición de vehículos eléctricos y la instalación de puntos de recarga. No obstante, su impacto sigue resultando limitado frente al observado en otros países europeos, debido a la insuficiente cobertura de infraestructuras, la dispersión de las ayudas y las barreras económicas para ciertos colectivos.

En este mismo proceso de transformación, la innovación tecnológica desempeña un papel cada vez más central, sobre todo en la transición hacia modos de transporte más limpios. En los últimos cinco años se ha multiplicado la oferta de vehículos completamente eléctricos e híbridos enchufables, tanto en flotas privadas como públicas. El transporte colectivo también ha comenzado a incorporar tecnologías eléctricas e, incluso, de hidrógeno en proyectos piloto de autobuses urbanos. No obstante, estos avances conviven con la persistencia de flotas contaminantes, en particular en el transporte de mercancías y de vehículos de segunda mano, lo que exige estrategias más ambiciosas de renovación del parque móvil.

En paralelo a estas innovaciones energéticas, la digitalización del transporte ha avanzado con la implantación de tecnologías como el *big data*, los sistemas inteligentes de transporte y el uso de inteligencia artificial para gestionar semáforos, optimizar flujos de tráfico y diseñar rutas más eficientes. Se trata de herramientas que no solo permiten reducir emisiones, sino también mejorar la experiencia del usuario y anticipar la demanda. La integración de estos sistemas en plataformas de MaaS es una tendencia en crecimiento, aunque todavía incipiente, en la mayoría de las urbes españolas.

A su vez, el sector privado ha invertido en tecnologías emergentes como los vehículos conectados y automatizados, que, si bien todavía se encuentran en fases experimentales, podrían modificar de forma radical la movilidad urbana en el futuro. No obstante, estas innovaciones requieren marcos normativos claros y una reflexión sobre sus implicaciones sociales y territoriales, especialmente en términos de acceso y privacidad.

Por último, la sociedad civil ha desempeñado un papel crucial en la promoción de modelos alternativos de movilidad. Iniciativas ciudadanas como los proyectos de peatonalización de calles, las mejoras temporales en el espacio urbano, las redes de ciclovías temporales y las campañas de sensibilización sobre movilidad activa han ganado visibilidad. Estas acciones han demostrado que la transformación del espacio urbano no solo depende de grandes inversiones, sino también de la capacidad de innovar desde lo cotidiano, con el respaldo de comunidades organizadas y gobiernos locales comprometidos.

En conjunto, las medidas y estrategias puestas en marcha en los últimos años han abierto nuevas oportunidades para avanzar hacia una movilidad más sostenible. Sin embargo, su impacto real mantiene la dependencia de varios factores clave: la coordinación entre los distintos niveles de gobierno, la continuidad en el tiempo de las políticas, la capacidad de las instituciones para llevarlas a cabo y el grado de implicación de la ciudadanía en su diseño y su seguimiento.

dos



El papel del CSIC en la transformación de la movilidad urbana

ANTE los profundos retos que plantea la transformación del sistema de movilidad urbana, el CSIC contribuye desde múltiples disciplinas con soluciones innovadoras, basadas en evidencia científica y tecnología avanzada. Según se expone a continuación, las líneas de trabajo abordan la movilidad con una perspectiva integral, que incluye el análisis de datos a gran escala, el rediseño del espacio urbano, los impactos en la salud pública, el desarrollo de soluciones inteligentes y la transición energética.



21.

Liderazgo institucional en la generación de capacidades técnicas y el procesamiento de datos

LA capacidad de recopilar y procesar datos a gran escala desarrollada durante los últimos 15 años ha supuesto una revolución en los análisis de movilidad y ha permitido entender dónde se concentra la población, sus desplazamientos diarios y, por ende, sus necesidades de transporte. Hasta entonces, los datos de movilidad se obtenían a partir de costosas encuestas, pero en época reciente tanto el INE como el MITMA han adoptado tecnologías que obtienen información de nuevas fuentes, como la red de telefonía móvil. Según datos de Red.es, en 2024, existían en España casi 59,5 millones de líneas telefónicas móviles (más que habitantes, pues algunas personas disponen de más de una) y la estadística experimental del INE estima que los 3 mayores operadores cubren cerca del 80 % de la población.

El CSIC desempeña un papel pionero y de liderazgo mundial en lo referente al uso de los datos provenientes de tecnologías móviles para estudiar y modelar la movilidad y el transporte. Ha firmado acuerdos con las principales operadoras del país y con empresas de datos nacionales e internacionales, como Google, para acceder a información que permita caracterizar el uso de la urbe por parte de sus habitantes y planificar y dimensionar el transporte. Por ejemplo, el patrón de actividad de los teléfonos móviles permite caracterizar el uso del suelo en las principales ciudades españolas y, por tanto, permite conocer los hábitos de la población y optimizar el diseño urbano y los sistemas de movilidad.

El CSIC utiliza una variedad de datos, como información de redes sociales y plataformas digitales y fuentes de operadores económicos en línea, para impulsar proyectos en áreas diversas. Estos abarcan desde la detección de puntos débiles en las redes de transporte y la reducción de retrasos en vuelos, hasta la respuesta de las ciudades ante eventos masivos. También trabaja en iniciativas centradas en el análisis del uso del suelo, los patrones de desplazamiento turístico y la movilidad interurbana, evaluando su impacto en la calidad de vida. Además, ha explorado la conexión entre la movilidad y la propagación de enfermedades infecciosas, la integración de comunidades migrantes y la evolución del mercado inmobiliario, entre otros ejemplos.

22.

Promoción de la investigación a nivel urbano y de la reconfiguración de los espacios públicos

LA Nueva Agenda Urbana auspiciada por la Organización de las Naciones Unidas busca promover ciudades más incluyentes, compactas y conectadas mediante la planificación, el diseño, la gobernanza y la economía urbana, y procura crear un vínculo de refuerzo recíproco entre urbanización y desarrollo. En este contexto, la movilidad es un elemento central para el desarrollo urbano y constituye un factor clave para materializar el modelo de ciudad sostenible e inclusiva que persigue la estrategia urbana española.

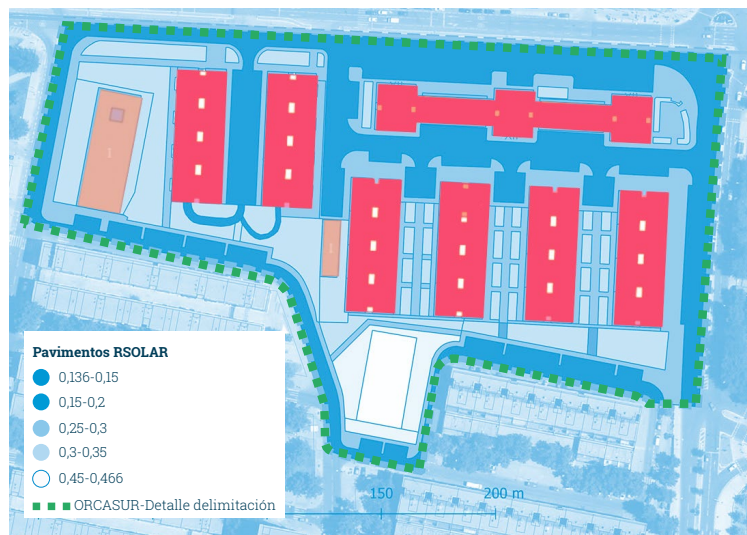
Desde el punto de vista socioeconómico, el desarrollo de sistemas de transporte se debe enfocar en la universalidad para contribuir a la construcción de una sociedad justa en la que se fomente la igualdad de oportunidades. La pobreza energética aplicada a la movilidad (también denominada *pobreza de movilidad*) debe entenderse como una vulneración de derechos fundamentales que constituye un obstáculo estructural para el ejercicio de otros como el trabajo, la educación, la salud y la participación, ya que genera barreras y aislamiento social en las personas que la sufren. Esta definición reconoce que la movilidad es un derecho fundamental y que los obstáculos económicos para acceder a ella constituyen una forma de exclusión social que debe ser abordada mediante políticas públicas integrales, que incluyan mejoras en el transporte público y desarrollen una planificación territorial que reduzca la dependencia del vehículo privado.

Desde el CSIC se realizan estudios a escala urbana para analizar las consecuencias sociales del uso ineficiente de la energía en la edificación y el transporte en nuestras urbes. Se están desarrollando modelos de datos espaciales que integran información de emisiones de ambos sectores con el objetivo de identificar las áreas que generan mayor impacto ambiental y socioeconómico

Una sólida base científica demuestra que el rediseño del espacio urbano hacia la movilidad activa no solo resulta viable, sino altamente efectivo: mejora la salud, reduce el consumo de energía y las emisiones, disminuye la congestión, revitaliza las economías locales y favorece una convivencia más segura entre distintos modos de transporte. Estos estudios respaldan intervenciones como los itinerarios peatonales, la creación de plazas urbanas, las zonas de tráfico calmado o las redes ciclistas segregadas, seguras y conectadas.

Además, la manera en la que está configurada hoy en día la movilidad presenta un fuerte impacto en la intensidad de la isla de calor. El rediseño del espacio urbano para reducir el asfalto, disminuir las superficies selladas y aumentar la vegetación, junto con la utilización de las propiedades termo-ópticas de los materiales de acabado superficial (de manera que ayuden a gestionar la radiación solar), puede resultar muy útil para reducir la temperatura en el espacio público e incrementar la resiliencia de las urbes ante el calentamiento global y los fenómenos climáticos extremos. En el CSIC se están realizando investigaciones que aportan un enfoque científico, cuantitativo y aplicado para mejorar la habitabilidad urbana desde el rediseño del espacio público, sus materiales y la vegetación, todo ello orientado de forma directa a mitigar problemas como la isla de calor urbana, mejorar la eficiencia energética y redundar en el confort y la salud de la ciudadanía.

Figura 5 Caracterización experimental de la reflectancia solar (albedo) de los pavimentos en un estudio de detalle en el barrio de Orcasur, en Madrid





23.

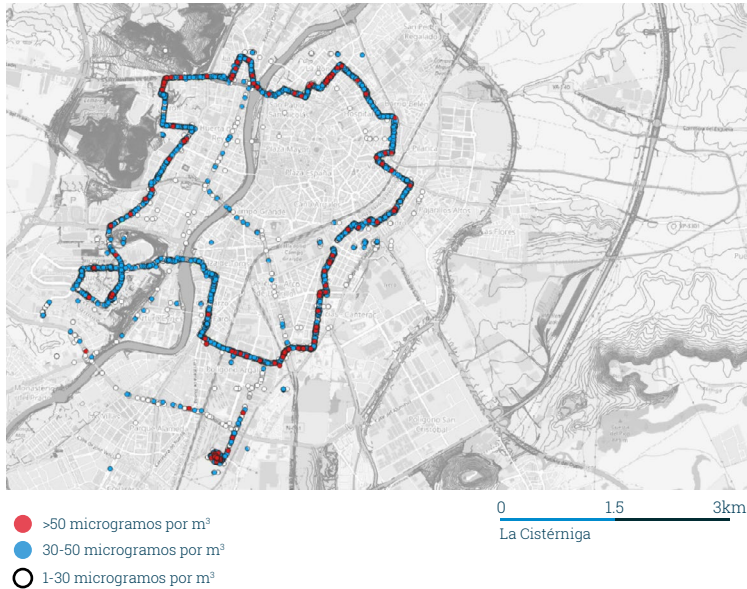
Actuaciones clave en el desarrollo de tecnologías que vinculan la movilidad urbana y la salud

LA relación causa-efecto entre la contaminación atmosférica y la afectación de nuestra salud (mortalidad y morbilidad) está ya demostrada desde hace más de dos décadas; de hecho, este fenómeno se reconoce como la primera causa de muerte prematura de carácter ambiental a nivel global. En las ciudades, el tráfico rodado es una de las fuentes principales de dióxido de nitrógeno y de partículas en suspensión. Además, es responsable de gran parte de las emisiones de contaminantes emergentes, como el carbono negro y las partículas ultrafinas (con diámetro inferior a 0,1 micrómetros), entre otros, cuyo impacto en la salud es potencialmente muy relevante.

En el CSIC se está investigando a varios niveles en el desarrollo de sistemas de medición y detección de amenazas químicas y biológicas. Este trabajo se lleva a cabo en relación con la calidad del aire tanto en interiores como en el exterior. La diferencia no es banal, puesto que una mala calidad exterior no implica lo mismo en interiores y viceversa. Constituye un ejemplo reciente el despliegue de una red de detectores de micropartículas PM_{2,5} móviles que se ha realizado en la ciudad de Valladolid. Con un diámetro de 2,5 micrómetros o menos, estas partículas son tan pequeñas que pueden pasar al torrente sanguíneo a través de los pulmones. Los mencionados dispositivos se instalaron en los autobuses de transporte público, que realizaban mediciones durante sus rutas. Tras procesar los datos, los resultados mostraron la concentración por hora en cada tramo de calle con una gran resolución espacial, casi en tiempo real y a un coste bajo.

Otro caso de estudio interesante en interior consistió en la detección de partículas metálicas creadas por el frenado y la toma de curvas de medios de transporte como trenes, tranvías y, sobre todo, metros. Su concentración se midió en distintas posiciones dentro de los trenes y en los andenes, con resultados muy interesantes acerca de cómo se acumulan en el inicio de estos respecto a la marcha de los trenes. Un ejemplo final sobre la tecnología que se desarrolla en el CSIC para evaluar la calidad del aire interior tiene que ver con la existencia de amenazas biológicas, es decir, virus como el que genera la COVID-19 o los de la gripe común, en autobuses y vagones. Se han establecido métodos para medir de forma eficiente tanto la posible contaminación de las superficies como su presencia en el aire.

Figura 6 Mapa de la densidad de partículas en suspensión en un entorno urbano



Además, en el CSIC se está trabajando también en el desarrollo de modelos receptores, ya sea para contaminantes legislados o para los emergentes. La iniciativa se lleva a cabo en varias urbes, como Barcelona, con modelos basados en datos de tráfico, y Valladolid, donde se ha creado uno de microsimulación de viajes. Todos ellos parten de información obtenida de fuentes diversas: el catastro, la estadística oficial de la población, la encuesta de hogares del INE —que define el tamaño y la composición de los hogares por zona censal—, datos económicos procedentes de Hacienda sobre niveles de renta por distrito censal, así como bases de datos de actividades y negocios y datos de telefonía sobre desplazamientos, entre otros. El objetivo es generar poblaciones sintéticas con propiedades similares a las reales. La herramienta predice los modos de transporte y las rutas más probables en caso de que se utilice el vehículo privado, y puede realizar una estimación de las emisiones por calle. Los resultados así obtenidos son aplicables a estudios epidemiológicos que buscan la relación entre un incremento de la exposición a contaminantes y un aumento de la mortalidad y la morbilidad a corto o a largo plazo.

En definitiva, toda esta tecnología de medida de emisiones, así como los métodos y los modelos desarrollados, presentan un gran potencial para contribuir al diseño de políticas públicas que tengan como objetivo mejorar la calidad del aire y son aplicables a cualquier ciudad de España.



2.4.

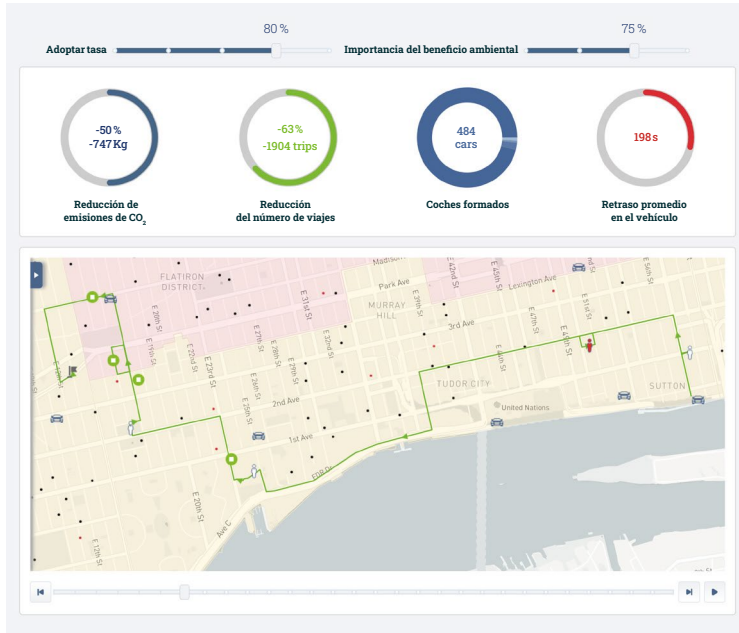
Impulso de la movilidad inteligente en escenarios reales y complejos

La transformación digital está abriendo nuevas posibilidades para repensar la movilidad urbana desde una lógica más eficiente, segura y sostenible. Frente a retos crecientes como la urbanización acelerada, la degradación ambiental, la congestión estructural y la presión sobre las infraestructuras existentes, las soluciones inteligentes permiten mejorar tanto la planificación como la operación y la experiencia del sistema de transporte. Estas soluciones se basan en la integración de datos en tiempo real, la automatización, las plataformas digitales y los algoritmos avanzados, elementos que, en conjunto, configuran un nuevo paradigma de movilidad basada en el conocimiento.

Uno de los ámbitos más disruptivos es el desarrollo de vehículos autónomos y conectados, cuyo despliegue representa una de las transformaciones tecnológicas más profundas en el transporte urbano. Su potencial para reducir la siniestralidad, optimizar los flujos de tráfico, mejorar la eficiencia energética y contribuir a la descarbonización del sistema es ampliamente reconocido. Sin embargo, también plantea importantes desafíos en materia de regulación, seguridad, interoperabilidad y adaptación al entorno urbano. En este contexto, el CSIC ha impulsado en los últimos años múltiples iniciativas orientadas a dotar de inteligencia, fiabilidad y capacidad adaptativa a estas tecnologías, con un enfoque centrado, sobre todo, en su viabilidad en escenarios reales, complejos y diversos.

Entre las principales líneas de trabajo, destaca el desarrollo de arquitecturas de navegación y control que permiten a los vehículos automatizados operar con distintos niveles de autonomía, integrando de forma dinámica mecanismos de supervisión humana cuando las condiciones del entorno lo requieran. Esta lógica de control compartido resulta clave para evitar una automatización opaca o en exceso dependiente de decisiones algorítmicas poco transparentes, y busca generar sistemas comprensibles y confiables para los usuarios, los operadores y las autoridades. En paralelo, el CSIC ha desarrollado estrategias avanzadas de percepción del entorno que permiten a los vehículos interpretar su contexto inmediato sin recurrir a mapas de alta definición, lo cual reduce barreras de entrada económicas y técnicas y facilita su implantación en urbes de tamaño medio o con menor densidad de infraestructura digital.

Figura 7 Simulación de una política de movilidad compartida computada en tiempo real, resultante en una reducción de un 50 % de las emisiones de CO₂ y de un 63 % de la congestión vehicular



La automatización en entornos logísticos segregados –como puertos, plataformas intermodales, zonas industriales o terminales de carga– constituye otro ámbito en el cual el CSIC ha realizado avances sustantivos. Estos espacios, al operar bajo condiciones más controladas, permiten validar tecnologías autónomas en operaciones repetitivas de bajo riesgo, como la distribución interna de mercancías o el traslado de contenedores.

Las experiencias acumuladas en estos contextos ofrecen aprendizajes cruciales para una futura expansión hacia áreas urbanas compartidas y permiten consolidar capacidades operativas, reducir costes de ensayo y fortalecer la aceptación social y regulatoria de dichas tecnologías. También se han explorado esquemas de navegación cooperativa entre vehículos automatizados, incluidas formaciones tipo *platooning*, que combinan automati-

zación, comunicación vehículo a vehículo (V2V) y capacidades de teleoperación. Estas configuraciones muestran un gran potencial para optimizar la logística urbana de última milla, especialmente en corredores de alta demanda.

Otra línea emergente se centra en el diseño de vehículos definidos por *software* (SDV) con capacidades de actualización remota, sustitución dinámica de sensores y adaptación continua a condiciones operativas cambiantes. Esta aproximación permite la evolución de los sistemas sin necesidad de reemplazo físico, lo cual mejora su resiliencia tecnológica y refuerza la seguridad desde la fase de diseño. En conjunto, estas contribuciones reflejan que la automatización del transporte requiere no solo soluciones técnicas robustas, sino también una integración coherente con las necesidades urbanas, la estructura normativa y los objetivos de sostenibilidad.

Más allá del vehículo, la inteligencia artificial y el análisis de datos abren nuevas oportunidades para diseñar políticas públicas orientadas a transformar los patrones de movilidad urbana. En muchas ciudades, el uso del vehículo privado sigue resultando predominante, con niveles de ocupación muy bajos. En Estados Unidos, por ejemplo, solo un 9,3 % de los trabajadores comparte automóvil en sus trayectos, mientras que el 76,4 % conduce solo, según datos de 2022. Para hacer frente a esta realidad, el CSIC ha desarrollado modelos basados en algoritmos de inteligencia artificial que permiten simular escenarios de movilidad compartida y evaluar sus efectos sobre el sistema urbano. Un estudio reciente ha mostrado que este tipo de herramientas podrían ayudar a incrementar la ocupación media de los vehículos hasta en un 80 %, al tiempo que se reducen las emisiones de CO₂ y la congestión en los principales corredores metropolitanos. Tales políticas pueden diseñarse de manera complementaria al transporte público existente, mediante la identificación de los porcentajes de adopción necesarios para alcanzar beneficios significativos y el ajuste de las intervenciones en función del contexto urbano, la demanda potencial y la capacidad de absorción de la red.

Un ejemplo ilustrativo de esta capacidad lo ofrece una investigación del CSIC realizada en la Ciudad Condal, donde se exploraron rutas verdes peatonales calculadas no solo según la distancia, sino también considerando información histórica y en tiempo real sobre la calidad del aire obtenida a partir de sensores distribuidos por la urbe. Los resultados mostraron que los ciudadanos podrían reducir hasta en un 8 % su exposición a contaminantes atmosféricos sin alterar de modo sustancial su recorrido habitual. Este tipo de intervenciones, en apariencia sencillas, abren la puerta a soluciones de alto impacto basadas en una mejor integración de los datos en las decisiones cotidianas de movilidad.

De forma complementaria, la combinación entre datos urbanos, en muchos casos en tiempo real, y modelos predictivos está permitiendo optimizar procesos clave para la gestión de la movilidad. Entre las aplicaciones más avanzadas destacan la sincronización adaptativa de semáforos (olas verdes), que facilita una mayor fluidez en arterias urbanas sin necesidad de ampliar infraestructuras físicas; la gestión dinámica de carriles reversibles o restringidos; y el rediseño de los accesos o salidas de las ciudades en función de la demanda. Estas soluciones también se extienden a situaciones extraordinarias, como grandes eventos culturales, deportivos o políticos, en las que se requiere planificar y facilitar el desalojo seguro de decenas de miles de personas en cortos períodos de tiempo.

Para este tipo de escenarios, el CSIC ha impulsado el desarrollo de los llamados *gemelos digitales del transporte*, que consisten en modelos virtuales de las redes urbanas que integran datos empíricos, simulaciones y algoritmos de optimización. Estas herramientas permiten simular el comportamiento del sistema en condiciones normales y también en eventos extremos, como inundaciones, olas de calor o nevadas. Actualmente, se han completado análisis en ocho urbes del mundo —incluidas Madrid y Barcelona— para estudiar cómo responde la red de transporte público ante distintos niveles de saturación. Los resultados permiten identificar puntos críticos, zonas con mayor capacidad de absorción y estrategias para escalar la respuesta en caso de duplicar o multiplicar hasta por 10 el número de usuarios previstos. Este tipo de capacidades resultan fundamentales para mejorar la resiliencia de las ciudades ante crisis futuras, pero también para optimizar la eficiencia operativa en las condiciones diarias.

2.5.

Desarrollo de tecnologías energéticas y materiales avanzados para una movilidad sostenible

El objetivo de contar con una movilidad urbana sostenible pasa por la descarbonización del transporte, es decir, la sustitución de los vehículos basados en combustibles fósiles por otros con sistemas energéticos mucho más eficientes y sostenibles. En este sentido, el coche eléctrico ha experimentado recientemente un gran empuje y se estima que, en 2030, circularán en el mundo más de 120 millones de unidades. Hoy en día, estos automóviles utilizan sobre todo baterías de iones de litio como sistema de aporte de energía. Estas proporcionan una autonomía promedio de 400 kilómetros, una vida útil de 150 000 kilómetros y recargas del 80 % en 30 minutos. Sin embargo, la demanda exige implementar amplias mejoras en cuanto a la autonomía del vehículo y cargas mucho más rápidas, así como reducir costes y aumentar la seguridad y la sostenibilidad de los sistemas energéticos del vehículo.

Desde el CSIC se impulsan diferentes líneas, como el desarrollo de una nueva generación de baterías, la utilización de materiales innovadores para sus distintos componentes y el reciclado para la recuperación de los más críticos. Con el objetivo de reducir costes de producción y alcanzar los objetivos de la Unión Europea para el año 2030 (conseguir un coste inferior a 75 euros por kilovatio hora a nivel de paquete de baterías), se está realizando un gran esfuerzo en el desarrollo de baterías basadas en tecnologías alternativas como las de iones de sodio, teniendo en cuenta la abundancia y la disponibilidad de este último elemento.

Aunque estas ya se comercializan, aún existen aspectos que mejorar, como su densidad de energía y su vida útil. En el CSIC se está trabajando en distintos componentes (electrodos y electrolitos) que permitan aumentar, sobre todo, la densidad de energía de estas baterías, que en la actualidad resulta inferior a la proporcionada por las de iones de litio. Otras estrategias alternativas que se están explorando incluyen las baterías de iones multivalentes y las de metal-aire basadas en zinc, hierro, magnesio, aluminio, litio y sodio o bien en aleaciones de ellos.

Figura 10 Esquema de un nuevo concepto de batería



Por otra parte, uno de los grandes problemas que plantea la movilidad eléctrica es el gran consumo de materias primas que exige. Esto significa que, para alcanzar en 2050 el reto de la neutralidad climática, a la que la movilidad eléctrica contribuirá de manera muy importante, resultará necesario hacer frente a una ingente (y creciente) demanda de estos recursos finitos, lo que representará todo un reto. No solo las reservas conocidas de tales recursos naturales son insuficientes, sino que también debe tenerse en cuenta su concentración geográfica y el tiempo y el coste de su explotación.

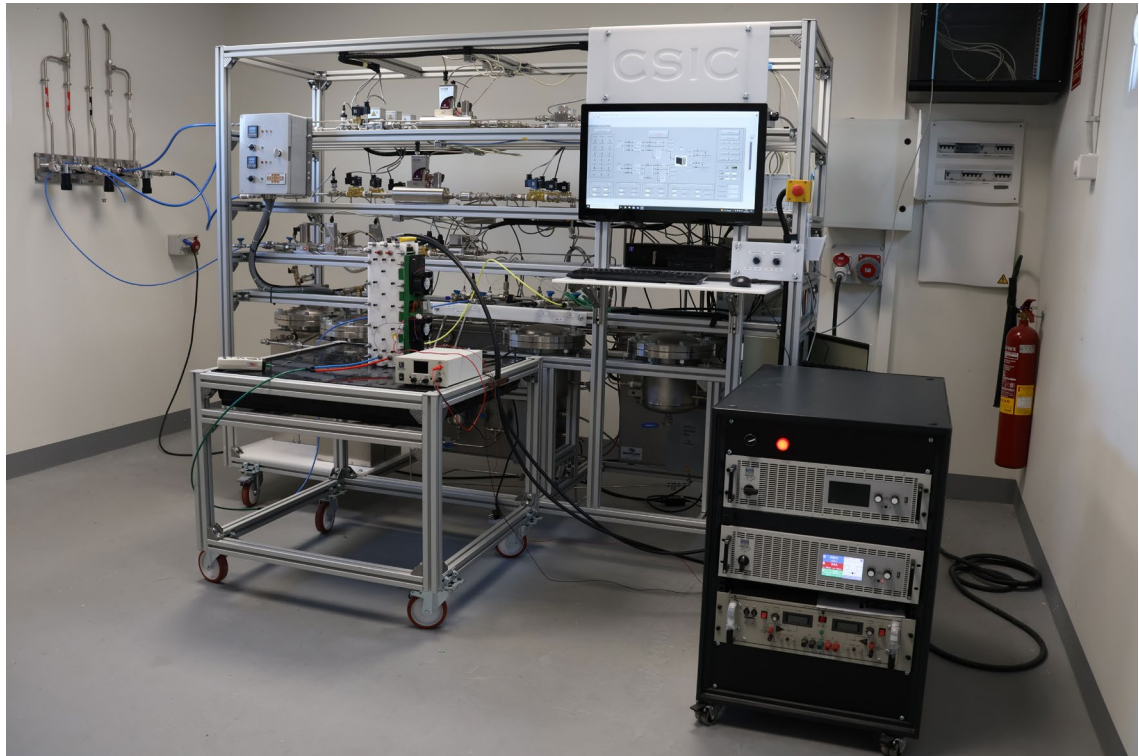
Ante este escenario, se hace imperativo crear productos que faciliten la recuperación de materiales al final de su vida útil; utilizar aquellos basados en recursos más abundantes o sostenibles; promover la eficiencia en el uso y, por tanto, la minimización del consumo de materias primas; y fomentar la reutilización de componentes (por ejemplo, al dar un segundo uso a las baterías de vehículos eléctricos en sistemas de almacenamiento estacionario). El CSIC trabaja intensamente en grandes consorcios y proyectos que abordan los distintos retos planteados por el reciclado de metales críticos de baterías y de motores de vehículos eléctricos, así como en nuevos modelos de movilidad para favorecer la economía circular y la transición energética.

Sin embargo, en algunas aplicaciones del transporte pesado, las baterías no suelen cubrir las necesidades energéticas de los vehículos. En estos casos, la utilización del vector energético del hidrógeno se presenta hoy en día como imprescindible. Los vehículos de hidrógeno utilizan motores eléctricos y, para ello, disponen de una pila de combustible que transforma dicho elemento en electricidad y agua, en un proceso inverso al de la electrólisis. Aquellos repostan en surtidores situados en estaciones de servicio, que suelen compartir espacio con surtidores de otros combustibles. El repostaje se realiza en apenas 5 minutos en vehículos ligeros y en unos 15 en los pesados, con autonomías que superan los 600 kilómetros. Un ejemplo de aplicación son las grúas y las carretillas elevadoras de los centros logísticos, que producen retrasos por el tiempo de cambio de baterías y requieren espacio para el almacenaje y la recarga de estas. Este combustible también resulta útil en flotas de vehículos de uso intensivo.

El CSIC posee capacidades científicas y tecnológicas en toda la cadena de valor del hidrógeno, desde su producción hasta el uso final. En su producción mediante electrólisis se desarrollan componentes para electrolizadores de distintos tipos; también se investiga en su generación por gasificación de biomasa o por reformado de residuos con emisiones de CO₂ cero o negativas mediante captura y almacenamiento de carbono (CCS). En algunos casos, se han aplicado estas técnicas en proyectos de desarrollo avanzado para la construcción de prototipos que han sido modelados y probados en entornos relevantes. La utilización en movilidad del hidrógeno producido requiere su distribución y almacenamiento por diferentes métodos, que también se están explorando.

Por otro lado, se trabaja en la producción de combustibles derivados de este elemento que después pueden ser utilizados en diferentes medios de transporte, como el metanol, el amoníaco o los combustibles sintéticos o electrocombustibles. La aplicación del hidrógeno en este ámbito requiere del desarrollo de pilas de combustible de alta eficiencia, baratas y que eviten el uso de materiales críticos. La tecnología estándar está basada en las de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM), y la eliminación del platino en los electrodos y su durabilidad constituyen factores claves. El desarrollo de electrolizadores para pilas de combustible de alta potencia requiere bancos de ensayo especializados, como el que el CSIC utiliza para caracterizar unidades de hasta 50 kilovatios.

Por último, en la actualidad está en marcha la construcción de un surtidor de hidrógeno diseñado por el CSIC en una estación de servicio de Zaragoza, que será de acceso público y podrá dispensar hasta 60 kilogramos al día. Este se producirá *in situ* mediante electrólisis a partir de energía solar y permitirá el suministro a 700 bares para vehículos ligeros y a 350 bares para autobuses.



Finalmente, como alternativa intermedia entre los actuales combustibles derivados de recursos fósiles y el vehículo eléctrico, se encuentran los biocombustibles sostenibles producidos a partir de residuos y subproductos industriales o agroindustriales. Se trata de una opción estratégica para la movilidad urbana sostenible, en especial en sectores de difícil electrificación, como el transporte de mercancías.

El CSIC desempeña un papel clave en el desarrollo de tecnologías avanzadas para la producción de estos biocombustibles, explorando múltiples rutas de conversión de biomasa y residuos mediante procesos termoquímicos, bioquímicos y catalíticos. Entre las líneas de investigación más destacadas se encuentra el procesamiento termoquímico de residuos lignocelulósicos y plásticos mediante pirólisis y licuefacción hidrotermal para la obtención de bioaceites, que, tras ser sometidos a procesos de mejoramiento, pueden transformarse en biocombustibles aptos para su uso en motores de combustión.

El CSIC cuenta con plantas de laboratorio y plantas piloto en las que se cubre desde la prueba de concepto experimental hasta la demostración de un prototipo en un entorno relevante, y posee experiencia en el escalado industrial de estos procesos. Actualmente trabaja en la integración de estas tecnologías en sistemas de calentamiento asistido por energía solar, así como en la aplicación de estrategias de digitalización, como el *machine learning* y el *big data*, con el objetivo de mejorar su eficiencia.

También se están estudiando a fondo residuos como los aceites de cocina usados y las grasas animales. A partir de ellos se obtienen productos como el biodiésel y el aceite vegetal hidrotratado (HVO). Estos procesos permiten reducir de modo notable la generación de subproductos y disminuir los requerimientos de hidrógeno, lo cual incrementa tanto la eficiencia energética como la sostenibilidad global del sistema.

tres



Conclusiones y recomendaciones

ESTA sección sintetiza las principales conclusiones del análisis y formula un conjunto de recomendaciones orientadas a los distintos actores implicados en la transformación de la movilidad urbana. El objetivo es ofrecer una hoja de ruta basada en la evidencia científica y la innovación tecnológica que contribuya a avanzar hacia un modelo más sostenible, inclusivo y eficiente.

Conclusiones

|||||

La movilidad urbana constituye uno de los grandes retos estructurales de las ciudades del siglo XXI. Su impacto abarca dimensiones sociales, económicas, ambientales y de salud pública, y condiciona directamente la equidad, la cohesión territorial y la calidad de vida de la ciudadanía. El modelo vigente, basado en la alta dependencia del vehículo privado y en un urbanismo disperso, muestra claros signos de agotamiento: congestión crónica, desigualdades en el acceso a oportunidades, contaminación atmosférica y acústica y elevados costes energéticos y económicos.

|||||

Los diagnósticos acumulados en la última década coinciden en señalar que **no basta con sustituir tecnologías contaminantes por alternativas más limpias** si no se transforman también los marcos de gobernanza, la planificación urbana y los hábitos de movilidad. Persisten riesgos de una transición superficial, centrada en la electrificación del coche privado, que podría reproducir las mismas dinámicas de exclusión, dependencia de recursos estratégicos y consumo intensivo de espacio urbano.

|||||

Avanzar hacia una movilidad verdaderamente sostenible requiere un enfoque integral que combine medidas en distintos niveles: reforzar el transporte público y la movilidad activa, desplegar energías renovables y vectores limpios como el hidrógeno, promover la integración digital inteligente de los diferentes sistemas de transporte y fomentar una participación ciudadana que otorgue legitimidad y apoyo social a las transformaciones.

|||||

En este proceso, **el CSIC desempeña un papel central y estratégico**. Sus contribuciones abarcan desde el **liderazgo en ciencia de datos aplicada a la movilidad** hasta el desarrollo de **modelos predictivos y gemelos digitales** que permiten anticipar el impacto de las políticas y mejorar la resiliencia de las urbes. El CSIC también ha generado conocimiento decisivo sobre la relación entre contaminación y salud, ha desarrollado **tecnologías de medición de emisiones** de alta resolución aplicables en entornos urbanos y ha realizado aportaciones relevantes en el **rediseño del espacio urbano**, lo cual demuestra cómo la ciencia puede ofrecer soluciones transversales que vinculan movilidad, salud y sostenibilidad ambiental.

|||||

Asimismo, el CSIC ha abierto camino en la investigación sobre **baterías de nueva generación, tecnologías del hidrógeno y biocombustibles avanzados**, contribuyendo con ello a que España no solo sea consumidora, sino también productora de innovación en movilidad sostenible. Estos desarrollos se completan con iniciativas en reciclaje y recuperación de materiales críticos, claves para reducir la dependencia exterior y avanzar hacia una economía circular.

|||||

En síntesis, la transición hacia un sistema de movilidad urbana sostenible no puede lograrse sin una base sólida de **conocimiento científico, innovación tecnológica y evaluación rigurosa**. El **CSIC aporta estas capacidades de forma única**, actuando como puente entre investigación, industria y Administraciones públicas, y ofreciendo evidencias y tecnologías que permiten diseñar políticas más eficaces, inclusivas y resilientes. Su contribución es, por tanto, no solo relevante, sino esencial para que España participe de manera activa en la transformación de la movilidad sostenible en Europa y en otros foros internacionales.

Recomendaciones

Las recomendaciones que se derivan de este análisis se estructuran en tres niveles: **decisiones públicas, empresas y sociedad**, con un énfasis especial en el papel de los gobiernos como responsables últimos de garantizar una movilidad sostenible, justa y eficiente.

1. Para los decisores públicos

Los Gobiernos son los responsables de articular el marco normativo, financiero e institucional que haga viable la transformación del sistema de movilidad. Para ello, se recomienda:

|||||

Impulsar una gobernanza integrada y coordinada entre las distintas Administraciones. La movilidad urbana exige estructuras de concertación estables y ágiles que faciliten la cooperación entre ministerios, comunidades autónomas, ayuntamientos y áreas metropolitanas, evitando la fragmentación actual y garantizando una visión coherente a medio y largo plazo.

|||||

Fortalecer el transporte público y la movilidad activa mediante inversiones sostenidas en infraestructuras ferroviarias, ciclistas y peatonales. Resulta prioritario reequilibrar la financiación pública para favorecer estos modos frente al automóvil privado, con el fin de garantizar servicios universales, accesibles y de calidad.

|||||

Integrar la evidencia científica y el análisis de datos en la planificación urbana, facilitando el acceso a infraestructuras digitales y clústeres de computación a investigadores y Administraciones locales. La creación de **gemelos digitales del transporte**, capaces de simular políticas antes de su implementación, permitiría anticipar impactos, reducir costes y aumentar la legitimidad de las decisiones.

|||||

Establecer marcos regulatorios para la innovación digital mediante *sandboxes regulatorios* y *living labs urbanos* que permitan probar nuevas soluciones de movilidad en entornos controlados. La integración inteligente de diferentes modos (transporte público, micromovilidad, vehículos compartidos o automatizados) en plataformas digitales de MaaS debe ser una prioridad para garantizar intermodalidad real.

|||||

Desarrollar y estandarizar sistemas de medida de la calidad del aire y la contaminación urbana y asegurar que los datos se publiquen en abierto y sean utilizados para orientar decisiones regulatorias, sanitarias y urbanísticas.

|||||

Promover la transición energética en el transporte mediante un marco normativo claro que incentive la electrificación, el hidrógeno verde y los biocombustibles avanzados de segunda generación, con **mecanismos de certificación de sostenibilidad** que aseguren reducciones reales de emisiones de gases de efecto invernadero.

|||||

Desplegar infraestructuras para el hidrógeno en toda la cadena de valor: producción (electrolizadores y renovables asociadas), transporte (gaseoductos) y distribución (surtidores urbanos y de carretera). Esta red debe planificarse mediante la colaboración público-privada y con criterios de eficiencia territorial.

|||||

Impulsar procesos de estandarización y normalización en el ámbito del hidrógeno y otras nuevas tecnologías, incluyendo **garantías de origen**, normas de seguridad y criterios de interoperabilidad que refuercen la confianza ciudadana e industrial.

|||||

Apoyar la reconversión industrial hacia sectores estratégicos, fomentando la especialización en la producción de baterías, pilas de combustible, electrolizadores y componentes para vehículos eléctricos e híbridos. Este proceso debe combinar incentivos fiscales, inversión en I+D y apoyo a pequeñas y medianas empresas.

|||||

Reducir la dependencia de materiales estratégicos impulsando políticas de reciclaje, reutilización y economía circular en baterías, motores y componentes electrónicos. En paralelo, se debe invertir en la investigación de materiales alternativos y abundantes para evitar la ralentización en la transición energética.

|||||

Asegurar una implantación territorial equilibrada de las energías renovables (eólica, solar, biogás, biocombustibles), combatiendo las resistencias locales con procesos participativos transparentes y campañas de sensibilización.

|||||

Fomentar la formación y la capacitación profesional en movilidad sostenible, desde la formación profesional hasta los posgrados especializados en ingeniería, ciencias de datos y tecnologías energéticas. La transición debe convertirse en motor de empleo de calidad y reducción de desigualdades territoriales.

|||||

Impulsar procesos participativos y de transparencia en la planificación territorial, garantizando que la ciudadanía forme parte activa de la transición hacia un nuevo modelo de movilidad, lo cual aumentará su legitimidad social y reducirá resistencias.

2. Para las empresas

El sector privado desempeña un papel central en el desarrollo tecnológico, la innovación industrial y la oferta de servicios de movilidad. Sus responsabilidades incluyen:

|||||

Invertir en innovación tecnológica en colaboración con universidades y centros de investigación, mediante el desarrollo de **clústeres industriales** que integren la producción de baterías, las tecnologías del hidrógeno, los biocombustibles de segunda generación y las soluciones digitales de movilidad inteligente.

|||||

Participar activamente en procesos de estandarización y normalización de infraestructuras, sistemas de seguridad y garantías de origen, garantizando la interoperabilidad tecnológica y la confianza ciudadana.

|||||

Reconstruir y reconvertir capacidades industriales para orientarlas hacia sectores estratégicos de la transición energética, mediante la creación de un tejido productivo robusto que reduzca la dependencia de importaciones y aumente la competitividad global de España en movilidad sostenible.

|||||

Adoptar prácticas de economía circular que reduzcan la dependencia de materias primas críticas, fomentando el reciclaje y la reutilización de baterías, motores y componentes electrónicos, así como el desarrollo de tecnologías de segunda vida para baterías usadas.

|||||

Promover la movilidad compartida y de bajas emisiones en operaciones logísticas y flotas corporativas, incluyendo la electrificación progresiva, el uso de biocombustibles avanzados y la integración de plataformas digitales para optimizar recorridos y reducir la huella ambiental.

3. Para la sociedad

La ciudadanía no representa un actor pasivo, sino un agente de cambio fundamental en la transición hacia la movilidad sostenible. Sus compromisos pueden articularse en torno a las siguientes actuaciones:

|||||

Adoptar patrones de movilidad más sostenibles, priorizando el transporte público, la bicicleta, la micromovilidad y los desplazamientos peatonales frente al coche privado.

|||||

Participar en procesos de planificación urbana y territorial, aportando una visión comunitaria que fortalezca la legitimidad y la eficacia de las políticas públicas.

|||||

Combatir la desinformación en torno a las energías renovables, las infraestructuras de transporte sostenible y los beneficios sociales y sanitarios de la transición, apoyándose en la evidencia científica.

|||||

Aprovechar las herramientas digitales disponibles (plataformas de MaaS, aplicaciones de rutas verdes, sistemas de transporte compartido) para reducir el impacto ambiental de los desplazamientos cotidianos y generar hábitos de movilidad sostenible.

cuatro



Listado de centros

|||||

CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Instituto de Carboquímica (ICB, CSIC)	http://www.icb.csic.es/	direccion.icb@csic.es
Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP, CSIC)	http://www.ictp.csic.es/	direccion.ictp@csic.es
Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR, CSIC)	http://www.incar.csic.es/	direccion.incar@csic.es
Instituto de Catálisis y Petroquímica (ICP, CSIC)	https://icp.csic.es	direccion.icp@csic.es
Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV, CSIC)	http://www.icv.csic.es/	direccion.icv@csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)	http://www.idaea.csic.es	direccion.idaea@csic.es
Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial (IIIA, CSIC)	http://www.iiia.csic.es/	direccion.iiia@csic.es
Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (IFISC, CSIC-UIB)	http://ifisc.uib-csic.es	direccion.ifisc@csic.es
Instituto de Robótica e Informática Industrial (IRII, CSIC-UPC)	http://www.iri.csic.es	direccion.iri@csic.es
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC, CSIC)	http://www.ietcc.csic.es/	direccion.ietcc@csic.es
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM, CSIC)	http://www.cenim.csic.es/	direccion.cenim@csic.es
Centro de Automática y Robótica (CAR, CSIC-UPM)	http://www.car.upm-csic.es	direccion.car@csic.es

cinco



Para saber más



PTI Mobility 2030 – Plataforma temática interdisciplinar del CSIC sobre movilidad sostenible. <https://pti-mobility2030.csic.es>



Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 (MITMA). <https://www.transportes.gob.es/movilidad-sostenible/estrategia-de-movilidad-segura-sostenible-y-conectada-2030>



Asociación Española del Hidrógeno, la Voz del Hidrógeno en España. <https://aeh2.org>



Asociación Europea de Colaboración en Baterías, Investigación e Innovación en la Cadena de Valor de Baterías. <https://bepassociation.eu/>



European Partnership on CCAM – Movilidad conectada, cooperativa y automatizada. <https://www.ccam.eu/>



Observatorio Europeo de Movilidad Urbana (ELTIS). <https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/>



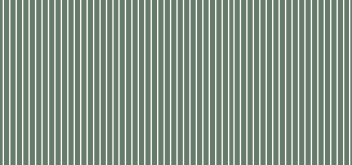
Planificación y seguimiento de la movilidad urbana sostenible – Comisión Europea. https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility-planning-and-monitoring_en



Zonas de bajas emisiones y equidad social – Instituto de Política Ambiental Europea. <https://ieep.eu/publications/low-and-zero-emission-zones-navigating-the-social-challenges-of-clean-air-policies-in-eu-cities/>



¿Cómo puede la investigación en movilidad urbana aumentar su impacto en las políticas públicas? – Artículo científico.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667091722000024>



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL
CSIC

SCIENCE  POLICY