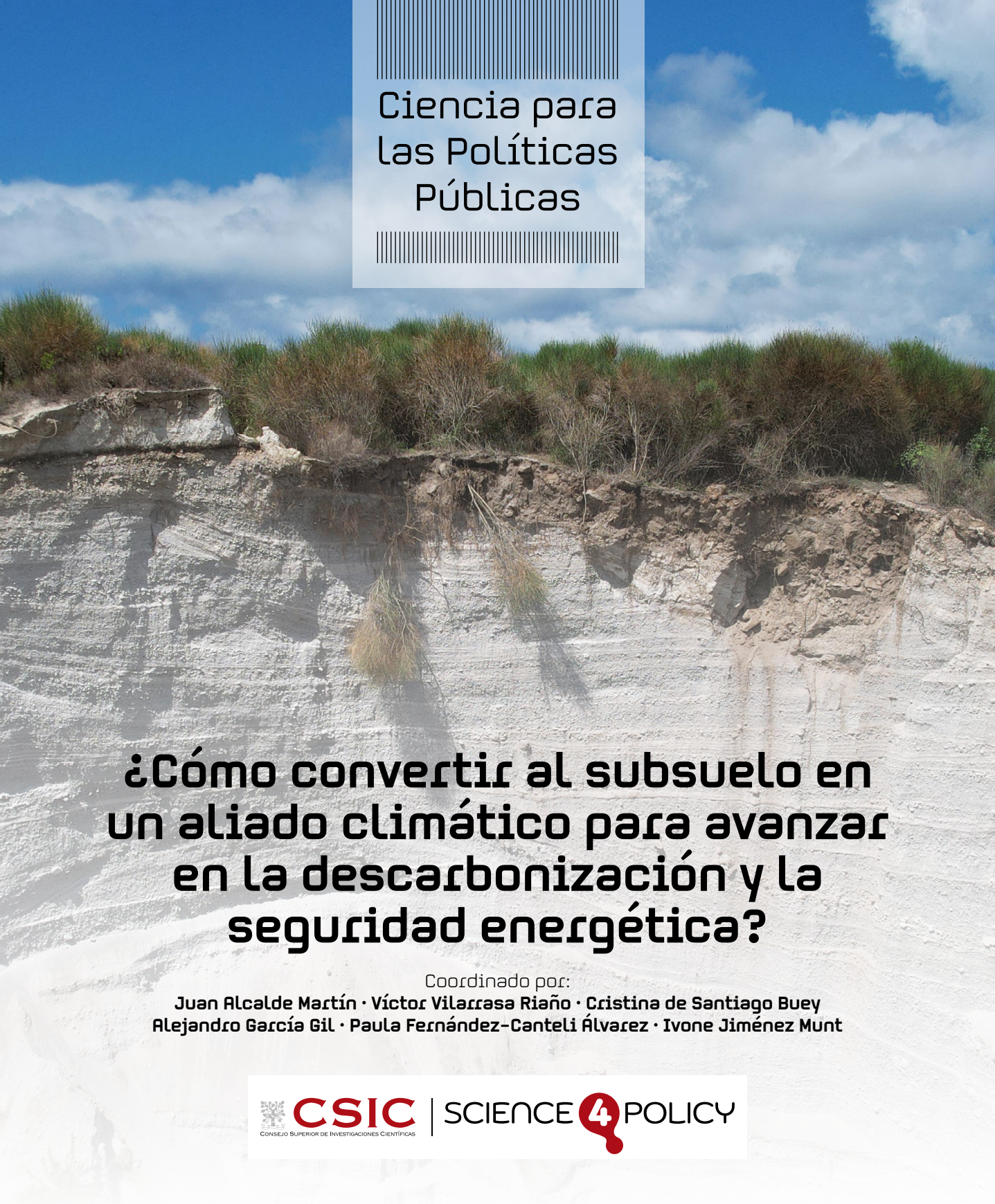


Ciencia para
las Políticas
Públicas



¿Cómo convertir al subsuelo en un aliado climático para avanzar en la descarbonización y la seguridad energética?

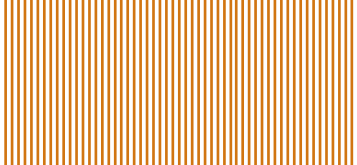
Coordinado por:

Juan Alcalde Martín · Víctor Vilarrasa Riaño · Cristina de Santiago Buey
Alejandro García Gil · Paula Fernández-Canteli Álvarez · Ivone Jiménez Munt



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: 155-26-003-0
e-NIPO: 155-26-004-6
Depósito Legal: M-1849-2026

Edición no venal

En el marco de la Conexión Geociencias, elaborado por:
Juan Alcalde Martín
Víctor Vilarrasa Riaño
Cristina de Santiago Buey
Alejandro García Gil
Paula Fernández-Canteli Álvarez
Ivone Jiménez Munt

Colaboradores:
Ignacio Marzán Blas
José Francisco Mediato Arribas
Eike Marie Thaysen
Silvia De Simone
Jesús García Crespo
María Covadonga Pevida García
Fernando Rubiera González

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

Cómo citar este informe: Alcalde Martín, J., Vilarrasa Riaño, V., Santiago Buey, C. de, García Gil, A., Fernández-Canteli Álvarez, P., & Jiménez Munt, I. (2026). *¿Cómo convertir al subsuelo en un aliado climático para avanzar en la descarbonización y la seguridad energética?*. 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 convertir al subsuelo en un aliado climático para avanzar en la descarbonización y la seguridad energética?*, de la colección Ciencia para las Políticas Públicas, presenta una visión integral del papel del subsuelo en la descarbonización y la seguridad energética. El documento analiza cómo la geotermia, el almacenamiento geológico de energía y la captura y almacenamiento de CO₂ pueden contribuir a la neutralidad climática, destacando las capacidades científicas y tecnológicas del CSIC y proponiendo líneas de acción para un uso eficiente de estas tecnologías.

ÍNDICE

uno

|||||

El subsuelo, clave para la descarbonización

- 1.1. Introducción: el subsuelo como recurso esencial y estratégico
- 1.2. El sistema descarbonizado del futuro: tecnologías, capacidades y aplicaciones del subsuelo

dos

|||||

Aportaciones del CSIC en torno al subsuelo como recurso estratégico sostenible

- 2.1. Investigación integral en energía geotérmica somera
- 2.2. Impulso del conocimiento geocientífico para el desarrollo de la energía geotérmica profunda
- 2.3. Desarrollo de cadenas de valor en captura y almacenamiento de dióxido de carbono
- 2.4. Liderazgo en la investigación aplicada y multidisciplinar en el almacenamiento subterráneo de energía

tres

|||||

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

|||||

Listado de centros

cinco

|||||

Para saber más





uno



El subsuelo, clave para la descarbonización

El subsuelo es un recurso estratégico para acelerar la descarbonización y reforzar la seguridad energética. Como recurso clave para alcanzar un sistema descarbonizado y resiliente, ayuda a estabilizar la red, a reducir emisiones, y favorece la creación de nuevas cadenas industriales y empleo de calidad. Esta sección aborda sus cuatro pilares: la geotermia somera, que permite una climatización urbana eficiente; la geotermia profunda, que proporciona electricidad renovable firme; la captura y almacenamiento geológico de CO₂, esencial para abatir emisiones industriales; y el almacenamiento geológico de energía, en forma de hidrógeno y calor, que aporta capacidad masiva y estabilidad al sistema.



1.1.

Introducción: el subsuelo como recurso esencial y estratégico

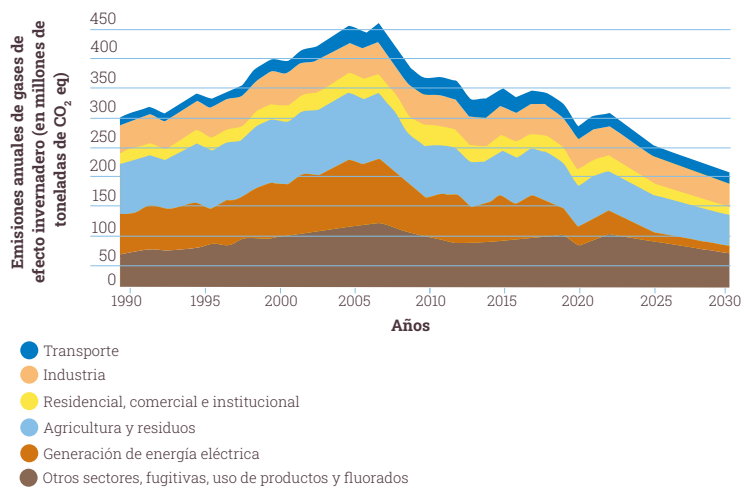
El cambio climático, impulsado por las emisiones masivas de gases de efecto invernadero, es un desafío global con impactos directos en la salud pública, la seguridad energética, la estabilidad económica y el bienestar social. Los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) reiteran con urgencia la necesidad de tomar medidas inmediatas y profundas para limitar el calentamiento global a 1,5 °C y mitigar así los efectos más graves del cambio climático. Sin embargo, pese a décadas de alertas científicas, las emisiones globales siguen en aumento y los eventos excepcionales, como la pandemia de la COVID-19, apenas han logrado reducciones temporales.

En respuesta a esta problemática, la Unión Europea puso en marcha en 2019 el Pacto Verde Europeo (European Green Deal), una hoja de ruta estratégica que marca el rumbo hacia la neutralidad climática en 2050. Posteriormente, en 2021, lanzó el paquete legislativo Objetivo 55 (Fit for 55), diseñado para garantizar la reducción de al menos un 55 % de las emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2030 respecto a los niveles de 1990. Ambos instrumentos configuran un marco político y regulatorio ambicioso orientado a alcanzar la neutralidad climática mediante medidas integradas que combinan electrificación, eficiencia energética, despliegue masivo de energías renovables, impulso de la economía circular y soluciones basadas en la naturaleza.

España, alineada con estos compromisos europeos, estableció en su Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023-2030 (PNIEC) el objetivo de reducir un 32 % sus emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 respecto a los niveles de 1990, propósito que se encuentra en revisión para ajustarse al Objetivo 55 y aumentar la ambición climática nacional.

Actualmente, tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero en España proceden del consumo energético (generación de electricidad, transporte, industria y climatización), lo que convierte su descarbonización en el eje principal de la estrategia climática nacional. El PNIEC apuesta sobre todo por una combinación de la electrificación de los consumos, mejoras en eficiencia energética y el despliegue masivo de energías renovables, como la solar fotovoltaica y la eólica.

Figura 1 Objetivo de reducción de emisiones brutas de GEI a 195,2 MtCO₂ eq en 2030, según el PNIEC



Estas medidas ya han permitido avances relevantes en la descarbonización del sector energético, pero al mismo tiempo han sacado a la luz desafíos estructurales cada vez más evidentes. Por ejemplo, las tecnologías renovables más maduras, como la solar fotovoltaica y la eólica, compiten directamente por el uso del territorio con otros intereses (agrícolas, urbanos o de conservación de espacios naturales protegidos), y esto genera conflictos sociales, ambientales y políticos que dificultan y ralentizan su expansión a gran escala. Además, su producción energética depende de recursos naturales variables como la radiación solar y el viento, lo que introduce una marcada intermitencia y estacionalidad en la generación eléctrica. Sin mecanismos adecuados de respaldo y almacenamiento, esta variabilidad supone un riesgo real para la estabilidad del sistema eléctrico.

Para cumplir con los objetivos de neutralidad climática en 2050, es necesario reducir de forma drástica y sostenida las emisiones globales en las próximas décadas. Alcanzar las emisiones netas nulas no es trivial y requerirá que el sistema energético del futuro disponga de una combinación flexible de tecnologías que actúen de manera sinérgica. La electrificación, el almacenamiento de energía y la transformación de la demanda tendrán que convivir en un modelo más descentralizado y resiliente. Además, la captura y el almacenamiento de CO₂ de aquellas emisiones ajenas al sistema energético contribuirán a la reducción final de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, **el subsuelo puede ofrecer capacidades únicas para cubrir funciones críticas del sistema que las infraestructuras en superficie no pueden asumir** por completo.

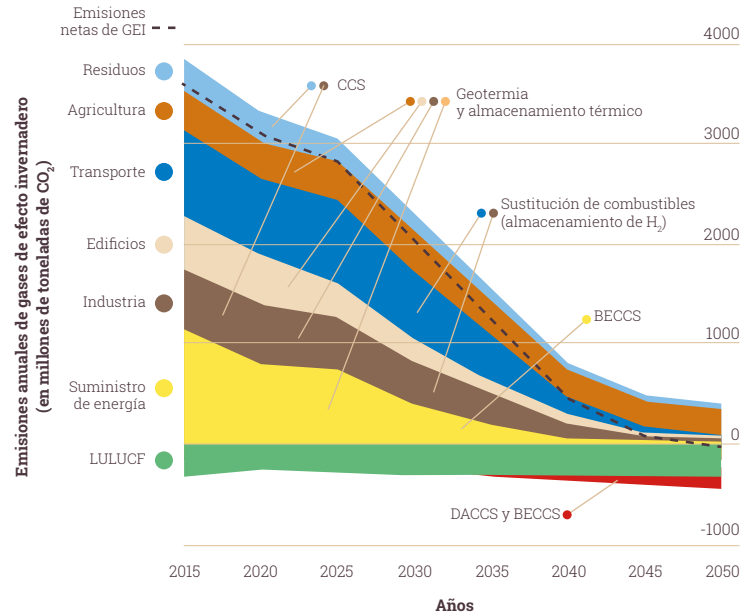
El subsuelo, históricamente explotado para la extracción de recursos como el petróleo, el gas o los minerales, debe convertirse en un recurso estratégico al servicio de la transición. Este cambio de paradigma **—del subsuelo como recurso extractivo a soporte activo del sistema descarbonizado—** redefine su papel en el futuro climático neutro. En concreto, el subsuelo ofrece cuatro grandes aplicaciones —que se explican en detalle en los siguientes apartados— con un potencial relevante en la lucha contra el cambio climático.

Por un lado, la **energía geotérmica**, fuente renovable constante proveniente del interior de la Tierra y, por lo tanto, independiente del clima, destaca por su fiabilidad y su capacidad para aportar estabilidad al sistema energético. Además, la energía geotérmica ofrece un amplio abanico de aplicaciones, desde la climatización de edificios hasta la generación de electricidad limpia, pasando por el almacenamiento subterráneo de energía en forma de calor.

Por otro lado, el **almacenamiento energético** se convierte en una pieza clave para garantizar la seguridad del suministro de energía. Sin embargo, las soluciones actuales en superficie —como baterías, tanques o almacenamiento en redes de tuberías— tienen limitaciones considerables en términos de volumen y presentan

Figura 2 Objetivos de descarbonización para alcanzar la neutralidad climática en 2025 en la UE y tecnologías del subsuelo que contribuirán a su cumplimiento

Emisiones de GEI en la UE en el periodo 2015-2050 y contribución de las tecnologías del subsuelo



posibles riesgos para la seguridad civil, dada su vulnerabilidad frente a sabotajes o ataques deliberados. El sabotaje al gasoducto Nord Stream, por ejemplo, evidenció cómo este tipo de incidentes puede desestabilizar la seguridad energética europea, generar incertidumbre y disparar los precios del gas y la electricidad en numerosos países. El subsuelo, dada su capacidad para almacenar una gran cantidad de energía, emerge como una gran batería capaz de proporcionar suficiente almacenamiento y compensar los desajustes entre generación y demanda energética. De esta forma, actúa como un estabilizador esencial frente a la variabilidad inherente de otras fuentes renovables.

El uso de la capacidad del subsuelo como almacén seguro debe formar parte inevitable de la estrategia de neutralidad climática, tanto para almacenamiento de energía como para aquellas emisiones procedentes de la industria que no se pueden evitar, ya sea porque se producen en el propio proceso con independencia del combustible utilizado o porque se requieren temperaturas inalcanzables para la electrificación. Es el caso de sectores industriales básicos de la economía española como el del cemento, el acero o la química. Estas industrias, denominadas *de difícil abatimiento*, necesitan soluciones específicas para estas emisiones condicionadas por el propio proceso, como es la **captura y el almacenamiento geológico de carbono**, ya que su peso en el balance nacional de emisiones hace imprescindible su participación activa en las estrategias de descarbonización.

Por último, a todos estos retos se suma la necesidad de actuar sobre el legado histórico de emisiones acumuladas. El volumen de gases de efecto invernadero ya emitidos es tan alto que no basta reducir solo las emisiones futuras para cumplir los objetivos climáticos. Aun aplicando medidas estrictas de reducción, todavía existe el riesgo de superar temporalmente los límites seguros de temperatura global fijados en el Acuerdo de París, lo que supone impactos climáticos severos. Por ello, será indispensable desarrollar tecnologías **de extracción neta de carbono**, capaces de extraer de la atmósfera el carbono ya emitido con el fin de reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero y restablecer condiciones climáticas seguras.

1.2.

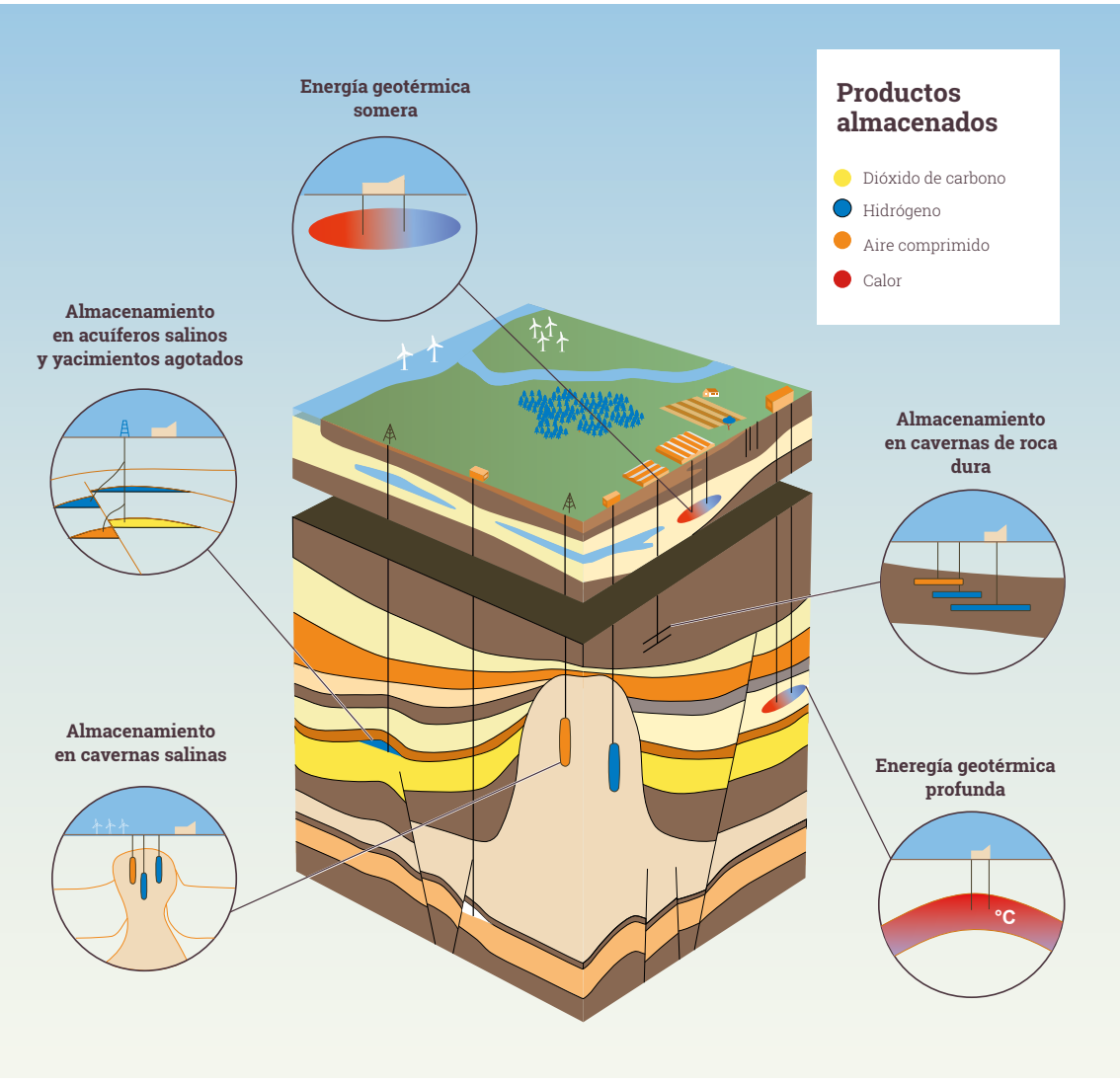
El sistema descarbonizado del futuro: tecnologías, capacidades y aplicaciones del subsuelo

AVANZAR hacia un sistema descarbonizado y resiliente requiere repensar no solo las fuentes de energía, sino también los recursos estratégicos que lo sustentan. La transición climática no puede depender únicamente de tecnologías en superficie, sino que es necesario incorporar el subsuelo para superar cuellos de botella como la variabilidad de las renovables, la descarbonización industrial y el almacenamiento de energía a gran escala. En este contexto, **el subsuelo emerge como un recurso esencial**, capaz de aportar soluciones únicas y complementarias que otras tecnologías no pueden ofrecer por sí solas.

Aprovechar este potencial no solo tiene sentido desde el punto de vista climático, sino también industrial y estratégico. **El tejido industrial y tecnológico español está preparado para liderar el despliegue de estas soluciones:** exploración del subsuelo, geofísica, obra civil, geotecnia, perforación, materiales avanzados, digitalización y automatización. A ello se suma una red de empresas energéticas, muchas con experiencia en la producción de hidrocarburos y gas natural, así como una infraestructura gaseísta consolidada que puede adaptarse a nuevos usos como el transporte de otros gases, como el CO₂ o el hidrógeno. La reutilización de capacidades existentes, junto con una política pública orientada a la innovación, permitiría generar empleo cualificado, activar nuevas cadenas de valor y posicionar al país como un nodo de referencia internacional en tecnologías del subsuelo para la transición energética.

Estas funciones estratégicas no parten de cero, sino que la experiencia acumulada en exploración, perforación y operación subterránea a escala global, sobre todo en la industria del petróleo y el gas, puede reconvertirse para usos compatibles con la neutralidad climática y, finalmente, permitir la extracción neta de carbono de la atmósfera. Por eso, aunque España no cuenta con una tradición significativa en la explotación de hidrocarburos, sí dispone de capacidades técnicas, infraestructuras y experiencia acumulada que pueden reconvertirse para fines compatibles con la transición energética.

Figura 3 Bloque diagrama mostrando las distintas aplicaciones que ofrece el subsuelo para alcanzar la neutralidad climática



En la actualidad, existen cuatro almacenes subterráneos de gas natural en operación (Serrablo, Gaviota, Yela y Marismas), que cumplen una función estratégica clave para la seguridad energética de nuestro país, así que estas y otras experiencias de planificación y gestión subterránea pueden servir como punto de partida para desarrollar nuevas aplicaciones alineadas con los objetivos climáticos y energéticos del país.

A pesar de su madurez tecnológica, estas soluciones basadas en el subsuelo se enfrentan a barreras importantes, sobre todo en el plano social. La percepción pública del riesgo, la falta de información y la experiencia previa de proyectos controvertidos —como el fallido almacén de gas Castor en la costa mediterránea— han generado cierta desconfianza hacia los usos del subsuelo. Pese a que los problemas en el proyecto Castor respondieron a un contexto geológico, regulatorio y de comunicación específico, sus efectos perduran en la memoria colectiva. Superar estos obstáculos requerirá un enfoque proactivo en la gobernanza del subsuelo: transparencia, trazabilidad, evaluación rigurosa de riesgos, divulgación científica y una implicación temprana de las comunidades locales en la toma de decisiones. Además, vincular estos desarrollos a los principios de una transición justa —que asegure beneficios locales, empleo de calidad y equidad territorial— puede ser clave para desbloquear su aceptabilidad y lograr una integración social más amplia y legítima de estas tecnologías.

En conjunto, el subsuelo no es una alternativa a las energías renovables en superficie, sino una pieza clave, necesaria para alcanzar de forma realista y sostenible los objetivos climáticos a la vez que se mejora la seguridad del sistema energético y se logra proporcionar una extracción neta de carbono de la atmósfera. **Convertir el subsuelo en la batería del mundo** no es una metáfora retórica, sino una posibilidad técnica al alcance de las políticas públicas si se actúa con decisión, coordinación y visión a largo plazo.

Figura 4 El subsuelo puede convertirse en la batería del mundo



Los siguientes apartados examinan con detalle cómo las aplicaciones energéticas del subsuelo —desde la energía geotérmica hasta el almacenamiento de energía y carbono— pueden convertirse en **pilares estructurales** que resulten esenciales **para garantizar la seguridad energética, reducir emisiones difíciles de abatir y alcanzar la neutralidad climática**.

Energía geotérmica somera

La energía geotérmica somera aprovecha la temperatura prácticamente constante del subsuelo a lo largo del año y la utiliza como un recurso energético renovable para la climatización. Este principio, utilizado de forma intuitiva desde la prehistoria —cuando los humanos se refugiaban en cuevas para protegerse del calor o del frío—, se aplica hoy mediante sistemas tecnológicos que intercambian calor con el terreno. En invierno, el subsuelo actúa como fuente de energía aportando calor, mientras que, en verano, actúa como sumidero térmico. Esto permite disponer de calefacción y refrigeración eficientes con muy bajas emisiones, lo cual es relevante, en especial, si se considera que la climatización representa cerca del 50 % del consumo energético final en la Unión Europea.

Las temperaturas alcanzadas por la energía geotérmica somera (por debajo de los 90 °C) no son suficientes para generar electricidad, pero resultan muy útiles para usos térmicos directos, como el *balneoturismo*, los procesos industriales, los invernaderos o los sistemas de calefacción urbana (*district heating*) y climatización de edificios mediante bomba de calor.

Existen dos tipos principales de sistemas de intercambio de calor. Por un lado, los sistemas de **circuito cerrado** utilizan tuberías enterradas —habitualmente en perforaciones de menos de 150 metros de profundidad— por las cuales circula un fluido que intercambia calor con el terreno sin mezclarse con él. Se trata de soluciones eficientes y fáciles de instalar, sin restricciones significativas de implementación en el territorio. Son ante todo adecuados para edificios residenciales, comerciales e institucionales, y resultan sobre todo ventajosos en terrenos de baja permeabilidad o en zonas costeras, donde ayudan a evitar la intrusión salina al no interactuar con los acuíferos.

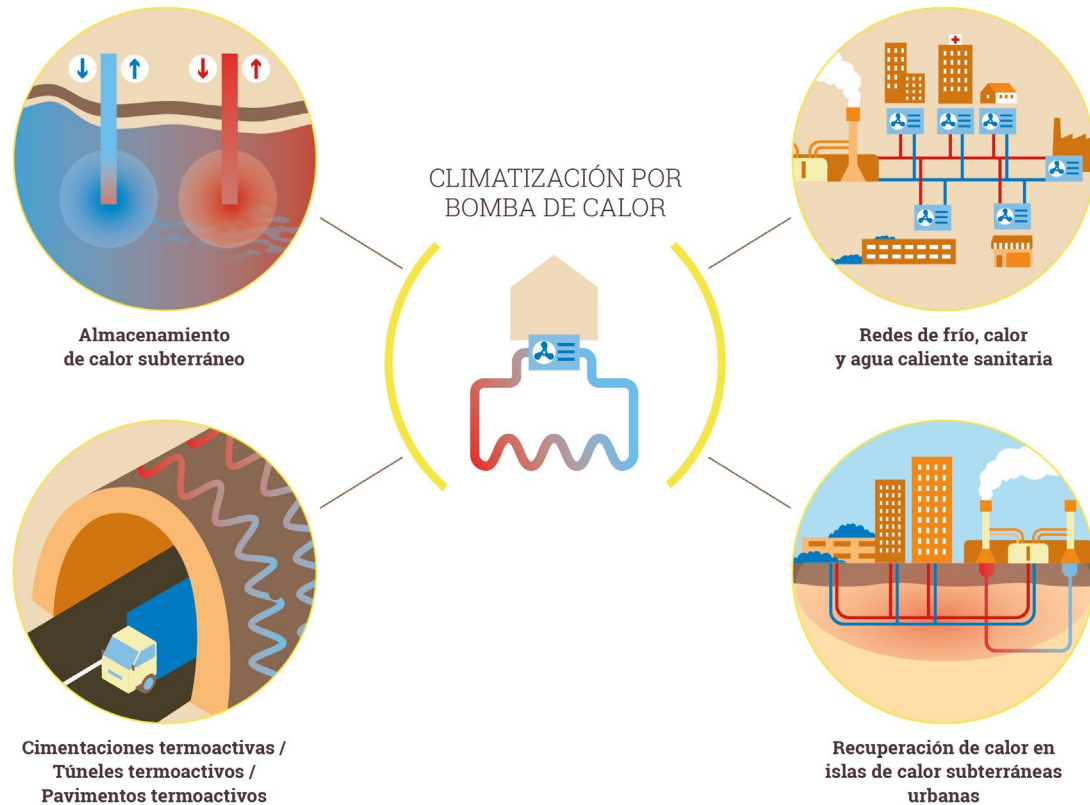
Por otro lado, los sistemas de **circuito abierto** bombean agua subterránea para el intercambio térmico y la reinyectan al acuífero tras ceder o absorber calor. Se caracterizan por su alta eficiencia, pero su viabilidad está condicionada a la presencia de acuíferos adecuados, en general en zonas de alta permeabilidad. Su implantación requiere garantizar que no se altere la calidad del agua subterránea y cumplir con la normativa vigente, lo que

implica la obtención de autorización por parte de las confederaciones hidrográficas, así como el cumplimiento de requisitos técnicos y ambientales específicos.

La **energía geotérmica somera** permite aprovechar la temperatura casi constante del subsuelo para suministrar **calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS)** con alta eficiencia y muy bajas emisiones. Esta función térmica puede desplegarse mediante distintos **tipos de aplicaciones**, adaptados al entorno construido, al tipo de infraestructura y a las condiciones hidrogeológicas:

- **Instalaciones individuales o de pequeña escala:** dirigidas a viviendas unifamiliares, pequeños edificios, oficinas o equipamientos. Emplean habitualmente **bombas de calor geotérmicas** acopladas a sistemas de circuito cerrado o abierto, capaces de entregar hasta 6 kWh térmicos por cada kilovatio hora eléctrico consumido.
- **Estructuras geoenergéticas termoactivadas:** integran el intercambio térmico en el propio hormigón estructural —pilotes, muros pantalla, túneles o estaciones subterráneas—, de modo que se sustituye a los intercambiadores convencionales. Esta estrategia permite climatizar edificios o estaciones de metro o fundir hielo en superficie en aeropuertos o carreteras, con lo que se incorpora energía renovable al tejido urbano.
- **Redes urbanas de climatización (*district heating & cooling*):** infraestructuras colectivas que abastecen a múltiples edificios mediante una red común. Combinan la energía geotérmica con otras fuentes renovables (solar térmica o calor residual) y almacenamiento térmico. Las **redes de quinta generación** operan a baja temperatura, ofrecen una alta eficiencia y permiten la calefacción y refrigeración simultáneas.
- **Reaprovechamiento del calor residual subterráneo:** en áreas urbanas densas, el calor acumulado bajo la ciudad —la denominada *isla de calor subterránea*— puede recuperarse como fuente energética renovable, a la vez que mitiga los impactos negativos en la durabilidad de cimentaciones e infraestructuras.

Figura 5 Principales opciones de aprovechamiento de la geotermia somera



¿Qué se sabe y qué se está haciendo?

Al respecto de la energía geotérmica somera, se presenta a continuación el estado actual y sus principales aplicaciones prácticas, con ejemplos de instalaciones de pequeña escala, redes urbanas de climatización, estructuras geoenergéticas y el aprovechamiento del calor residual acumulado en entornos urbanos.

Instalaciones de pequeña escala

Existe un gran número de viviendas que aprovecha la energía geotérmica mediante bomba de calor para los suministros de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria. En cuanto a ciudades, Zaragoza es el núcleo urbano con un mayor despliegue de energía geotérmica somera en el plano nacional, propiciado por la alta permeabilidad de su acuífero, con instalaciones de hasta 6 megavatios térmicos (MW_t). La energía geotérmica somera también se ha utilizado para climatizar edificios singulares, como el Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, en Barcelona, o la sede en Madrid del propio Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

Redes urbanas de climatización

En el ámbito internacional, países como los Estados Unidos, Alemania, Suecia, los Países Bajos, Suiza y Francia han integrado con éxito la energía geotérmica somera en sus estrategias energéticas, planes de edificación y redes urbanas de climatización. Un ejemplo destacado es la red de París, que desde los años setenta aprovecha el acuífero del Dogger (a 2000 m y 56 °C) para abastecer a más de 300 000 viviendas mediante una infraestructura geotérmica urbana pionera en Europa.

En el contexto nacional, destaca la red de energía geotérmica de Mieres (Asturias), impulsada por la Cátedra Hunosa de energía. Con una potencia térmica de cercana a los 6 MW, la red reutiliza el agua a 23 °C de la antigua mina de carbón de Barredo (cerrada en 1995 para climatizar centros educativos, residencias, instalaciones deportivas y un hospital. Se trata de la mayor red de energía geotérmica del país y supone un ejemplo de aprovechamiento energético y economía circular industrial en el que una infraestructura minera del pasado fósil se transforma en un activo renovable estratégico. El proyecto, premiado en 2019 con el Global District Energy Climate Award (otorgado por la Agencia Internacional de la Energía, Euroheat & Power, la Asia Pacific Urban Energy Association y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), anticipa el modelo de redes térmicas urbanas del futuro, lo que muestra que la energía geotérmica puede integrarse en sistemas inteligentes, descentralizados y sostenibles.

Estructuras geoenergéticas

El uso de estructuras en ámbitos urbanos para el aprovechamiento de calor se lleva investigando desde hace décadas y existen varios ejemplos de implementación exitosa. Entre ellos, destacan las **cimentaciones termoactivadas**, como las del edificio Palais Quartier (Fráncfort, Alemania), que dispone de más de 392 pilotes geotérmicos capaces de suministrar hasta 913 kilovatios térmicos (kW_t); **los túneles termoactivos**, que aprovechan el calor del macizo rocoso y del agua drenante, como ocurre en todos los túneles alpinos recientes, incluido el de San Gotardo (Suiza), que descarga 6700 litros por minuto de agua a 17 °C, lo que genera 1,86 megavatios térmicos; y las estaciones de metro, como las de Viena (Austria), que se climatizan mediante **intercambiadores integrados en muros y cimentaciones**.

Aprovechamiento del calor residual acumulado en el subsuelo urbano

La iniciativa Madrid Subterra constituye un ejemplo estratégico, ya que promueve la valorización del calor generado en infraestructuras subterráneas de Madrid como los túneles de transporte y los colectores de aguas residuales, que contribuyen a desarrollar redes de climatización urbanas más sostenibles. Esta visión representa una forma avanzada de reciclaje térmico urbano, alineada con los principios de economía circular, resiliencia climática y transición justa.

A pesar del potencial técnico de la energía geotérmica y de los casos de éxito existentes, su implantación en España se encuentra aún en un estadio inicial, como tecnología emergente condicionada por barreras no tecnológicas que ralentizan su despliegue. Una de las principales barreras a su uso generalizado es el propio desconocimiento de la tecnología, ciertas limitaciones debidas a la escasa formación y sensibilización tanto entre la ciudadanía como entre los propios responsables públicos, lo que dificulta su incorporación en planes urbanos, proyectos de edificación y políticas energéticas locales. A esto se suma la ausencia de un desarrollo regulatorio específico en el territorio nacional, que introduzca claridad y homogeneidad en los procedimientos.

Hasta la fecha, los únicos avances normativos significativos han sido dos. Primero, la publicación de la norma UNE 100715-1:2014, que establece criterios técnicos para el diseño, la ejecución y el seguimiento de instalaciones geotérmicas verticales de circuito cerrado, en cuya elaboración participó activamente el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). El segundo avance significativo para los sistemas abiertos fue el Real Decreto 35/2023, del 24 de enero, en especial el artículo 41.3, sobre límites de vertido térmico geotérmico, del Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Ebro, impulsado por la Confederación Hidrográfica del Ebro bajo el asesoramiento del IGME y que ya ha sido traspuesto a la mayoría de los planes hidrológicos de las distintas demarcaciones hidrológicas.

Sin embargo, a pesar de estos avances, urge definir cómo se articula la energía geotérmica dentro del marco jurídico nacional y clarificar su encaje en la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, y en el texto refundido de la Ley de Aguas aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, así como en las competencias compartidas entre Administraciones. También es necesario establecer protocolos claros para la concesión de permisos para la exploración, implantación y explotación de recursos geotérmicos que distingan entre aprovechamientos someros y profundos, y que garanticen simultáneamente la eficiencia, la trazabilidad y la protección ambiental. Superar estas barreras, tanto de conocimiento de la técnica como de desarrollo normativo, será clave para liberar el verdadero potencial de esta tecnología renovable dentro del sistema energético español.

Energía geotérmica profunda

La energía geotérmica profunda permite aprovechar el calor natural del interior de la Tierra para **generar electricidad renovable**. Este calor se localiza a varios kilómetros de profundidad, donde las temperaturas superan los 150 °C, umbral mínimo para un aprovechamiento eléctrico eficiente. Para acceder a este recurso, se perfora el subsuelo y se hace circular un fluido intercambiador, generalmente agua, que transporta el calor hasta la superficie. Este fluido calentado, una vez llega a la superficie, permite accionar turbinas generadoras de electricidad, ya sea de forma directa o a través de un circuito secundario que evita el contacto

con el fluido geotérmico original, de forma que se reducen los riesgos de corrosión y contaminación. Existe, además, la posibilidad de utilizar fluidos de bajo punto de ebullición en el ciclo secundario para aprovechar recursos de menor temperatura, incluso por debajo de los 100 °C, aunque con una menor eficiencia.

La generación eléctrica mediante energía geotérmica profunda se caracteriza por ser continua, limpia, local y con un impacto ambiental y territorial reducido. Estos sistemas pueden operar en cascada, mediante el uso del calor residual del fluido, para alimentar redes térmicas urbanas, procesos agrícolas o aplicaciones industriales y maximizar así la eficiencia del aprovechamiento energético.

El potencial de la energía geotérmica profunda está condicionado por el gradiente geotérmico, que es el aumento de temperatura con la profundidad. En promedio, el gradiente geotérmico es de entre 25 °C y 30 °C por cada kilómetro de profundidad, aunque varía mucho según el contexto geológico. Este gradiente influye directamente en la viabilidad técnica y económica de los sistemas geotérmicos. Además, para que el sistema funcione de forma eficiente, es necesario que el fluido circule por la roca y extraiga su calor, lo que exige una permeabilidad adecuada que facilite y optimice este intercambio térmico. Por ejemplo, para generar 5 megavatios eléctricos (MW_e) se requiere un caudal aproximado de 55 litros por segundo a 180 °C. Dependiendo del gradiente geotérmico, de la permeabilidad de la roca y de su temperatura, la energía geotérmica profunda se puede clasificar en los siguientes tipos:

- **Sistemas hidrotermales.** En áreas con una elevada temperatura cerca de la superficie, como en zonas volcánicas, se alcanzan los 100 °C a relativamente poca profundidad, por lo general entre 1 km y 3 km. Estos sistemas acostumbra a proporcionar temperaturas elevadas, de 200 °C o más, y, en ocasiones, en ellos coexisten vapor y agua líquida en profundidad. Los sistemas hidrotermales presentan con frecuencia altas permeabilidades, lo que facilita la circulación de fluidos en el subsuelo y, por lo tanto, el aprovechamiento de la energía geotérmica. Un pozo hidrotermal suele generar entre 3 MW_e y 5 MW_e.

- **Acuíferos calientes profundos.** En contextos de gradiente geotérmico normal, pueden encontrarse algunas cuencas sedimentarias profundas (a más de 4 km) con acuíferos a alta temperatura (a más de 150 °C). El agua de estos acuíferos profundos, muy mineralizada y no apta para el consumo, puede utilizarse para producir electricidad y para redes de calor. El aprovechamiento se hace a través de pozos de extracción e inyección, y, para que el proceso sea eficiente, el acuífero debe tener una buena permeabilidad, que proporcione un caudal suficiente. Estos sistemas pueden generar potencias similares a los pozos en sistemas hidrotermales.
- **Sistemas geotérmicos mejorados (EGS).** A profundidades en las que la temperatura es suficiente para generar electricidad, generalmente a más de 4 km, lo habitual es encontrar el zócalo cristalino. El zócalo está compuesto por granitos y otras rocas de muy baja permeabilidad que presentan una conductividad térmica elevada, lo que las convierte en excelentes intercambiadores de calor. No obstante, su baja permeabilidad requiere estimular las fracturas para alcanzar un caudal de explotación suficiente. La estimulación se realiza inyectando agua a alta presión; esto provoca la apertura y deslizamiento de fracturas existentes en la roca, lo que crea caminos por los que el agua puede circular y extraer el calor. La estimulación hidráulica conlleva un riesgo asociado de sismicidad inducida que ha de ser monitoreado y evaluado de forma continua. Este tipo de sistemas geotérmicos a menudo se denominan sistemas de roca caliente seca (HDR) y pueden llegar a generar potencias similares a los pozos en sistemas hidrotermales.
- **Sistemas geotérmicos supercalientes** (condiciones supercríticas del agua). Estos sistemas se caracterizan por tener una temperatura superior a 374 °C y una presión superior a 218 atmósferas, en las que el agua se encuentra en estado supercrítico. En estas condiciones, el agua presenta una capacidad calorífica muy superior a la del agua líquida y una alta compresibilidad, lo que permitiría **multiplicar por 10 la potencia generada, alcanzando hasta 50 MW_e por pozo**. Esto implica que un solo pozo podría suministrar electricidad a una población de 60 000 personas. Estos sistemas se encuentran en

zonas volcánicas profundas, entre 4 km y 5 km, o en zonas con menores gradientes geotérmicos a profundidades mucho mayores, a partir de unos 12,5 km.

¿Qué se sabe y qué se está haciendo?

En este punto, es preciso analizar el estado actual de la energía geotérmica profunda, incluidos los sistemas hidrotermales, los acuíferos calientes profundos, la geotermia mejorada (EGS) y los sistemas supercalientes, ámbitos de los que se destacan proyectos recientes, avances y experiencias.

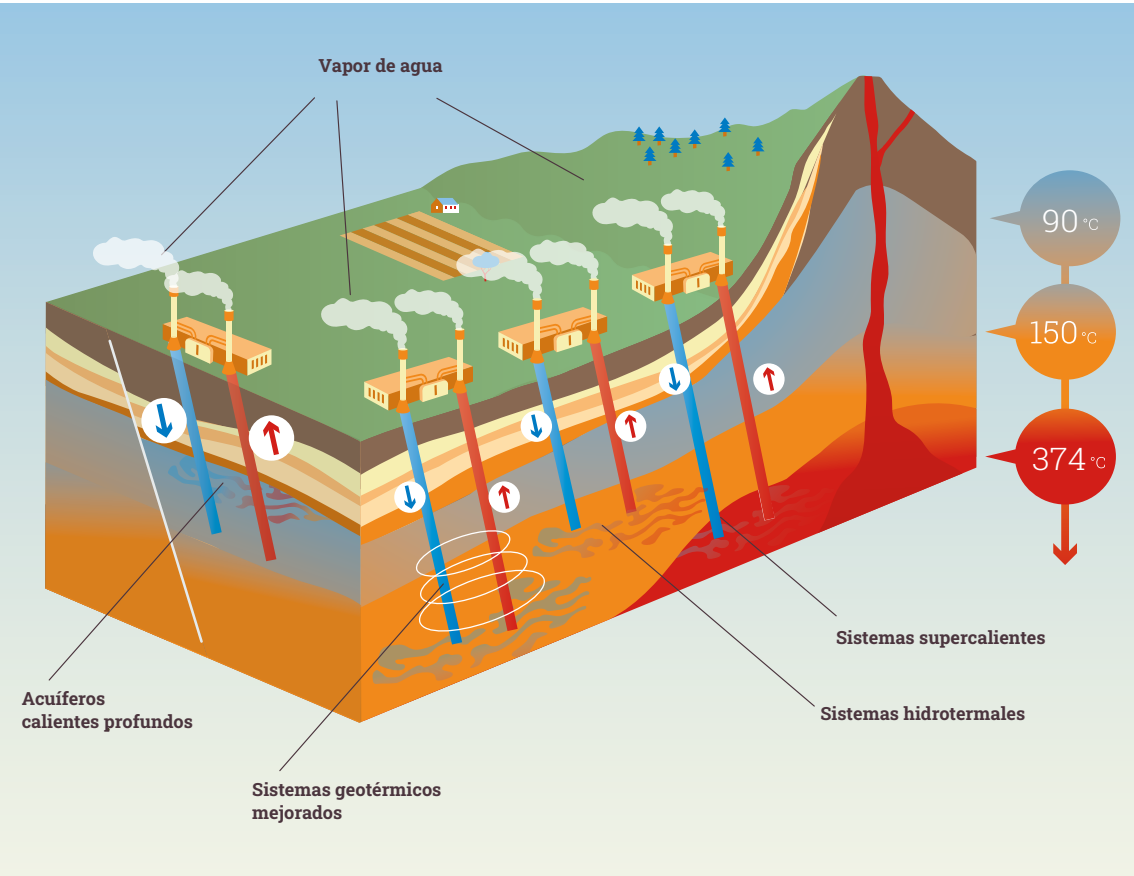
Sistemas hidrotermales

El primer uso industrial de este tipo de sistema se remonta a 1904 en Larderello (Italia), donde se construyó la primera planta que transformaba vapor natural en electricidad. En la actualidad, la mayoría de los **16 gigavatios eléctricos (GW) de potencia geotérmica instalada en el mundo** —equivalentes al 0,5 % de la potencia eléctrica instalada a escala global— corresponde a sistemas hidrotermales situados en zonas volcánicas o con fuertes anomalías térmicas. Se prevé que esta cifra aumente hasta alcanzar **al menos un 5 % de la potencia instalada en 2050**. La energía geotérmica es la principal fuente de energía en países situados en zonas volcánicas, como Islandia, donde supone el 70 % de la energía primaria. En España, existen proyectos de exploración para caracterizar el potencial geotérmico, sobre todo en las islas Canarias.

Acuíferos calientes profundos

En la actualidad, se está aprovechando la energía geotérmica en varios acuíferos calientes profundos, como los de Poing y Unterhaching (Alemania). Otros están en fase de estudio, como en los Países Bajos, donde disponen de sedimentos aprovechables hasta unos 7 km de profundidad. En España, se está desarrollando un proyecto en Melilla y se ha identificado potencial en zonas con surgencias geotermiales asociadas a fallas, como el prelitoral catalán o la zona de Llucmajor en Mallorca. También podría existir potencial en grandes cuencas sedimentarias, como la del Ebro, aunque será necesario **avanzar en la exploración** detallada para confirmar su viabilidad.

Figura 6 Principales tipos de sistemas geotérmicos profundos



Sistemas geotérmicos mejorados (EGS)

La explotación de estos sistemas mediante estimulación hidráulica lleva décadas en desarrollo, con algunos proyectos que han logrado generar electricidad de forma estable durante más de una década, como los llevados a cabo en Soultz-sous-Forêts y Rittershoffen, ambos en Francia. No obstante, la implementación de estos sistemas se ha visto limitada debido a la sismicidad inducida, sobre todo durante la fase de estimulación, en la que se inyecta agua a alta presión para aumentar la permeabilidad de la roca. Para mitigar la sismicidad inducida, se suele

emplear el método del semáforo, que impone restricciones en el caudal o la presión de inyección según el nivel de sismicidad registrado. Sin embargo, este método ha sido insuficiente en algunos casos, como en Basilea (Suiza) o Pohang (Corea del Sur), donde se registraron terremotos de magnitud 3,4 y 5,5 respectivamente, que llevaron a la cancelación de los proyectos.

En respuesta a este desafío, se ha investigado intensamente cómo reducir el riesgo sísmico, lo que ha motivado un cambio de paradigma: se ha pasado de estimular el pozo de forma masiva a hacerlo en múltiples etapas de forma más controlada, ajustando la estimulación a las características de cada fractura. Además, se ha empezado a implementar un concepto de estimulación multietapa alternativo que consiste en crear nuevas fracturas mediante fracturación hidráulica. Este nuevo concepto se ha implementado con éxito en el Project Red (Nevada, Estados Unidos) y existe otro proyecto en desarrollo en Cape Station (Utah, Estados Unidos), donde **se está construyendo una planta de 500 MW**, —equivalente a una central de ciclo combinado— con acuerdos de compra de energía ya firmados para las próximas décadas.

Sistemas geotérmicos supercalientes

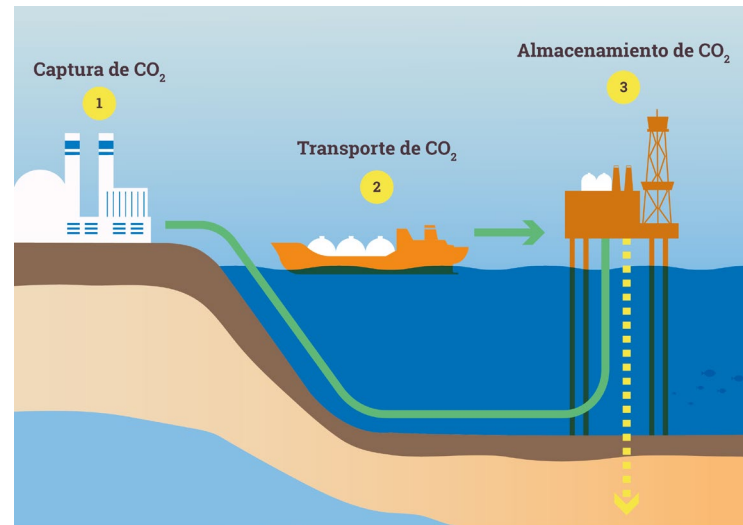
A pesar de que en la actualidad no existen plantas en operación comercial que exploten este tipo de sistemas, si se percibe un interés creciente debido a su gran potencial para la generación de electricidad a gran escala. La investigación sobre estos sistemas comenzó hace décadas, con proyectos pioneros como el Icelandic Deep Drilling Project (IDDP), en Islandia, donde ya se han perforado dos pozos que han alcanzado condiciones supercríticas y donde en breve se perforará un tercero. Asimismo, se están llevando a cabo nuevos proyectos con el objetivo de alcanzar agua supercrítica, como los de Aotearoa (Nueva Zelanda) o Newberry (Oregón, Estados Unidos), que exploran la viabilidad técnica y económica de estos sistemas. Por otro lado, están surgiendo desarrollos disruptivos en las tecnologías de perforación, como el uso de ondas milimétricas o la perforación sin contacto. Estas innovaciones podrían abrir la posibilidad de acceder a recursos supercríticos prácticamente en cualquier parte del planeta, con independencia del gradiente geotérmico local, lo que supondría un **cambio de paradigma en la energía geotérmica profunda**.

Captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂)

El almacenamiento geológico de CO₂ consiste en inyectar y almacenar CO₂ capturado en formaciones geológicas apropiadas y de forma permanente. Se trata de una tecnología considerada como una opción viable y segura para mitigar el cambio climático, sobre todo frente a las emisiones de difícil abatimiento. Este CO₂ proviene de industrias como la del cemento (con emisiones inherentes al proceso químico de producción), la siderurgia (por el uso de carbón como materia prima) y procesos de la refinación de petróleo, la producción química o el procesamiento de gas natural, que requieren altas temperaturas, obtenidas mediante combustibles fósiles. Esta tecnología resulta clave para abordar emisiones que no pueden eliminarse con otras medidas. Forma parte de la cadena de captura y almacenamiento de carbono (CCS) y, cuando se combina con usos del CO₂, se denomina *captura, uso y almacenamiento* (CCUS). Aunque es prioritario dar uso al CO₂ capturado, solo se consigue valorizar entre un 10 % y un 15 %; por ello, el almacenamiento geológico es imprescindible para abatir el CO₂ restante y reducir de forma efectiva las emisiones a la atmósfera.

El CO₂ puede también proceder de tecnologías de captura de emisiones biogénicas o de captura directa del aire para la extracción neta de carbono presente en la atmósfera. Entre estas tecnologías destacan la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) y la captura directa de CO₂ del aire con almacenamiento (DACCS), que permiten conseguir una extracción neta de carbono de la atmósfera. La BECCS combina la producción energética a partir de biomasa (plantas o residuos orgánicos que con anterioridad capturaron dióxido de carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis) con la captura y el almacenamiento geológico del CO₂ generado. La DACCS, por su parte, implica capturar directamente dióxido de carbono del aire mediante tecnologías avanzadas para su posterior almacenamiento permanente. Ambas tecnologías son clave para alcanzar la neutralidad climática, pues permiten compensar emisiones difíciles de eliminar por otras vías.

Figura 7 Cadena de valor de la captura, transporte y almacenamiento de CO₂ (CCS)



Las formaciones geológicas adecuadas para el almacenamiento incluyen acuíferos salinos profundos, yacimientos agotados de hidrocarburos y, en menor medida, capas de carbón no explotables y basaltos jóvenes (como en Islandia, donde se explora la mineralización del CO₂ en forma de carbonatos). La captura y el almacenamiento de carbono requiere una roca almacén porosa y permeable de gran extensión y capacidad, situada bajo un sello impermeable que impida el ascenso del CO₂. Estas formaciones deben encontrarse a más de 800 metros de profundidad, donde las condiciones de presión y temperatura permiten mantener el dióxido de carbono en estado supercrítico: un estado intermedio entre gas y líquido que, gracias a su alta densidad y baja viscosidad, facilita su confinamiento y maximiza la capacidad de almacenamiento en un volumen reducido.

Una vez inyectado el CO₂ en estas formaciones, diversos mecanismos de atrapamiento aseguran la retención permanente del dióxido de carbono: el **atrapamiento físico o estructural**, que impide que el CO₂ migre hacia la superficie por flotación; el **atrapamiento residual**, en el que el dióxido de carbono queda atrapado en los poros de la roca debido a fuerzas capilares y forma pequeñas burbujas aisladas que no pueden migrar; el **atrapamiento por solubilidad**, con el que el CO₂ se disuelve en el agua salada y crea flujos verticales debido a que este gas disuelto aumenta la densidad del agua, y, en el muy largo plazo, el **atrapamiento mineral**, en el que el CO₂ reacciona con la roca y forma compuestos minerales estables. Estos mecanismos actúan de forma conjunta en un rango temporal amplio (desde períodos inmediatos tras la inyección hasta miles o incluso millones de años después) e incrementan progresivamente la seguridad del almacenamiento hasta que el atrapamiento mineral garantiza un confinamiento permanente total.

La implementación de un almacenamiento geológico seguro consta de varias etapas. La **fase preoperacional** incluye estudios de factibilidad, licencias y caracterización geológica detallada inicial y tiene el objetivo final de verificar la seguridad del almacén. La **fase operacional** corresponde a la operación de almacenamiento propiamente dicha y dura entre 20 y 50 años. Por último, la **fase postoperacional** implica la clausura del almacenamiento y la transferencia de responsabilidad al regulador. Para garantizar la seguridad y efectividad del almacenamiento, se lleva a cabo un programa continuo de **monitorización** durante toda la vida del proyecto, también tras su clausura. Esto incluye el seguimiento de pozos de inyección, la observación geofísica desde la superficie y los controles geoquímicos que permiten comprobar en tiempo real el comportamiento del almacén y detectar posibles anomalías y fugas de CO₂.

¿Qué se sabe y qué se está haciendo?

La idea de almacenar dióxido de carbono no es nueva. De hecho, existen análogos naturales donde gases como el CO₂ o el gas natural han permanecido confinados durante millones de años, lo que permite estudiar la seguridad, los efectos geoquímicos y mineralógicos, los mecanismos de migración y los posibles impactos ambientales y sobre la actividad humana. Estos sistemas sirven también para validar modelos de predicción y técnicas de monitorización. Además, la industria del petróleo y del gas acumula décadas de experiencia inyectando CO₂ en yacimientos para mejorar la producción de hidrocarburos (*enhanced oil recovery*), lo que, aunque sin fines climáticos, ha permitido desarrollar una tecnología madura y comprender en detalle los procesos de inyección, monitoreo y gestión segura del dióxido de carbono en el subsuelo.

Se estima que la capacidad teórica de almacenamiento en Europa se sitúa entre 262 y 1500 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono, sobre todo en yacimientos y acuíferos localizados en el mar del Norte, según datos de la agencia Clean Air Task Force. En el caso de España, esta capacidad teórica ha sido revisada por el IGME, que ha establecido una capacidad de unas 11 Gt de dióxido de carbono, distribuido en 75 trampas en acuíferos salinos profundos y 10 en reservorios agotados de hidrocarburos, de modo que **la capacidad disponible supera con creces las necesidades de almacenamiento**.

Desde el punto de vista normativo, el almacenamiento geológico de CO₂ está regulado en la Unión Europea por la Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono, que garantiza la seguridad y la integridad ambiental del almacenamiento. En España, esta directiva se transpuso mediante la Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono, a falta, todavía, de un desarrollo normativo específico.

Para cumplir los objetivos climáticos europeos, la Comisión estima que será necesario almacenar 50 megatoneladas (Mt) de dióxido de carbono anuales en 2030 y hasta 480 Mt en 2050, sumando almacenamiento y uso en proporciones similares. Esto contrasta notablemente con los volúmenes actuales, que apenas alcanzan las 2 Mt de dióxido de carbono al año en instalaciones de Noruega (Sleipner y Snøhvit). No obstante, se espera alcanzar las 10 Mt de CO₂ anuales en los próximos 2 años mediante múltiples proyectos que están iniciando su actividad, como Northern Lights en Noruega, o que se encuentran en las últimas fases de construcción en el Espacio Económico Europeo, tales como Por-thos (Países Bajos), Greensand (Dinamarca) o East Coast Cluster y HyNet (Reino Unido). **A escala global, se están almacenando 50 Mt de CO₂ al año en 2025** y se espera alcanzar un almacenamiento anual de varias Gt en 2050.

La combinación del almacenamiento de CO₂ con otras tecnologías limpias es una aplicación innovadora y en desarrollo con mucho futuro. Un ejemplo de ello es el uso de dióxido de carbono como fluido para el almacenamiento de energía o para la generación de electricidad aprovechando la energía geotérmica en proyectos de almacenamiento permanente de CO₂.

En España, la tecnología se halla en fase de exploración y demostración, con iniciativas concretas como el almacén piloto de CO₂ de Hontomin (Burgos), construido por CIUDEN en 2014 —actualmente en parada y mantenimiento— y que inyectó algunas toneladas de CO₂ entre 2016 y 2017 dentro del proyecto europeo Enabling Onshore CO₂ Storage in Europe (ENOS); el permiso de exploración solicitado bajo la Ley de Minas por la empresa Carboncause en Murcia; el permiso de exploración solicitado por Repsol para el proyecto de almacenamiento TarraCO2-Storage a unos 40 km, en mar, frente a la costa de Tarragona, aún pendiente de resolución, y que ha obtenido 205 millones de euros de financiación del Fondo de Innovación europeo, y el proyecto europeo PilotSTRATEGY (2021-2026), que implica la caracterización detallada y el estudio de viabilidad de un potencial almacén en España, con participación del IGME, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y Repsol. Se conoce, además, la reciente solicitud de otros permisos de exploración en tierra.

Almacenamiento geológico de energía renovable

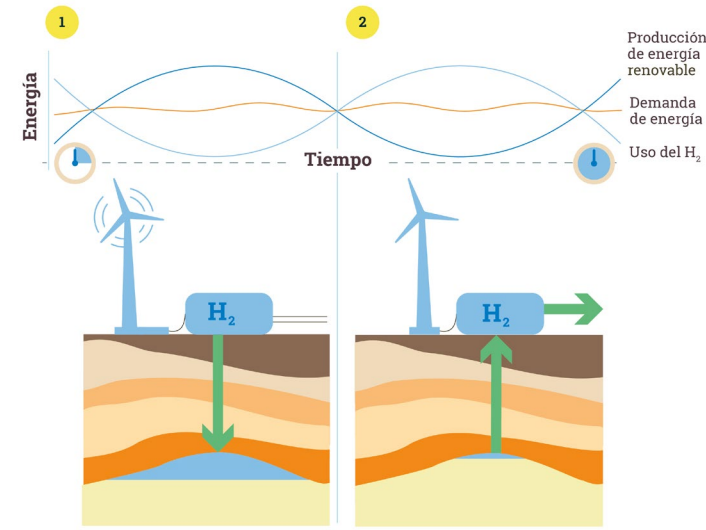
El almacenamiento geológico de energía renovable permite conservar el excedente de energía para su uso posterior, contribuyendo al equilibrio entre oferta y demanda. Al respecto, cabe revisar sus principales modalidades, como el almacenamiento subterráneo de vectores energéticos y el almacenamiento térmico en el subsuelo, además de sus aplicaciones en la actualidad.

Almacenamiento subterráneo de vectores energéticos

El almacenamiento subterráneo de vectores energéticos como el hidrógeno o el aire comprimido permite gestionar excedentes renovables a gran escala y durante períodos que van de horas a meses, de forma que cubre las funciones de respaldo que no pueden asumir tecnologías superficiales como los tanques presurizados o las tuberías. El excedente de energía renovable se convierte en un vector almacenable —por ejemplo, hidrógeno verde mediante electrólisis— que se inyecta en un volumen poroso y confinado del subsuelo durante los períodos en los que la demanda es inferior a la generación renovable para poder recuperarlos cuando la demanda sea superior a la producción. Las formaciones geológicas profundas ofrecen una solución natural y de alta capacidad (del orden de varios TWh) para usos estacionales e industriales, y son un pilar esencial de la economía del hidrógeno, pues permiten desacoplar producción y consumo, y garantizar la disponibilidad del vector cuando más se necesita.

Existen diversas configuraciones geológicas que pueden emplearse para el almacenamiento subterráneo de gas, cada una de ellas con características particulares. Las **cavernas salinas** se caracterizan por ofrecer una gran estanqueidad y estabilidad, ya que la sal es un material que tiende a cerrar naturalmente las fisuras y a mantener la integridad de la cavidad a lo largo del tiempo. Los **acuíferos salinos profundos**, por su parte, disponen de una gran capacidad de almacenamiento, aunque presentan una mayor incertidumbre en cuanto a la posibilidad de recuperar el gas inyectado debido a la complejidad de los flujos en el medio poroso. Los **yacimientos agotados de hidrocarburos** son formaciones que en el pasado han contenido petróleo o gas, lo que permite aprovechar datos históricos y, en muchos casos, reu-

Figura 8 Esquema del proceso de almacenamiento geológico de vectores energéticos



tilizar de forma parcial infraestructuras ya existentes. Por último, las **cavernas en roca dura** corresponden a minas abandonadas, túneles u otras cámaras excavadas en formaciones rocosas, que pueden adaptarse para el almacenamiento, aunque suelen requerir refuerzos para garantizar su seguridad.

El almacenamiento subterráneo destaca por su gran capacidad, la posibilidad de uso estacional, su estabilidad térmica y el bajo impacto visual, además de ofrecer sinergias con infraestructuras gasistas existentes que facilitan una transición técnica y económica hacia un modelo basado en fluidos renovables. Al mismo tiempo, representa un pilar esencial de la economía del hidrógeno, ya que permite desacoplar producción y consumo, estabilizar las redes de suministro a escala regional y garantizar la disponibilidad del vector energético en los momentos en que la demanda supera la generación renovable. Sin soluciones de almacenamiento geológico a gran escala, el despliegue industrial del hidrógeno verde se vería limitado tanto en alcance como en eficiencia.



Estos ejemplos internacionales confirman la viabilidad técnica, económica y ambiental del almacenamiento térmico subterráneo, que genera ahorros energéticos considerables y una reducción significativa de emisiones. No obstante, en España la adopción sigue siendo limitada, por lo que sería necesario impulsar políticas de apoyo y proyectos demostrativos específicos.



dos



Aportaciones del CSIC en torno al subsuelo como recurso estratégico sostenible

EL CSIC desempeña un papel fundamental en la investigación y el desarrollo de soluciones sostenibles vinculadas al aprovechamiento del subsuelo. En esta sección se abordan las aportaciones del CSIC para impulsar el conocimiento y la innovación en ámbitos estratégicos como la energía geotérmica somera y la energía geotérmica profunda, la captura y almacenamiento de CO₂ y el almacenamiento subterráneo de energía a través de una aproximación multidisciplinar que integra las geociencias, la ingeniería y la tecnología energética. Estas líneas de trabajo contribuyen a la optimización de los recursos del subsuelo y fomentan la capacidad científica y tecnológica necesaria para una transición hacia un sistema energético descarbonizado y resiliente.



2.1.

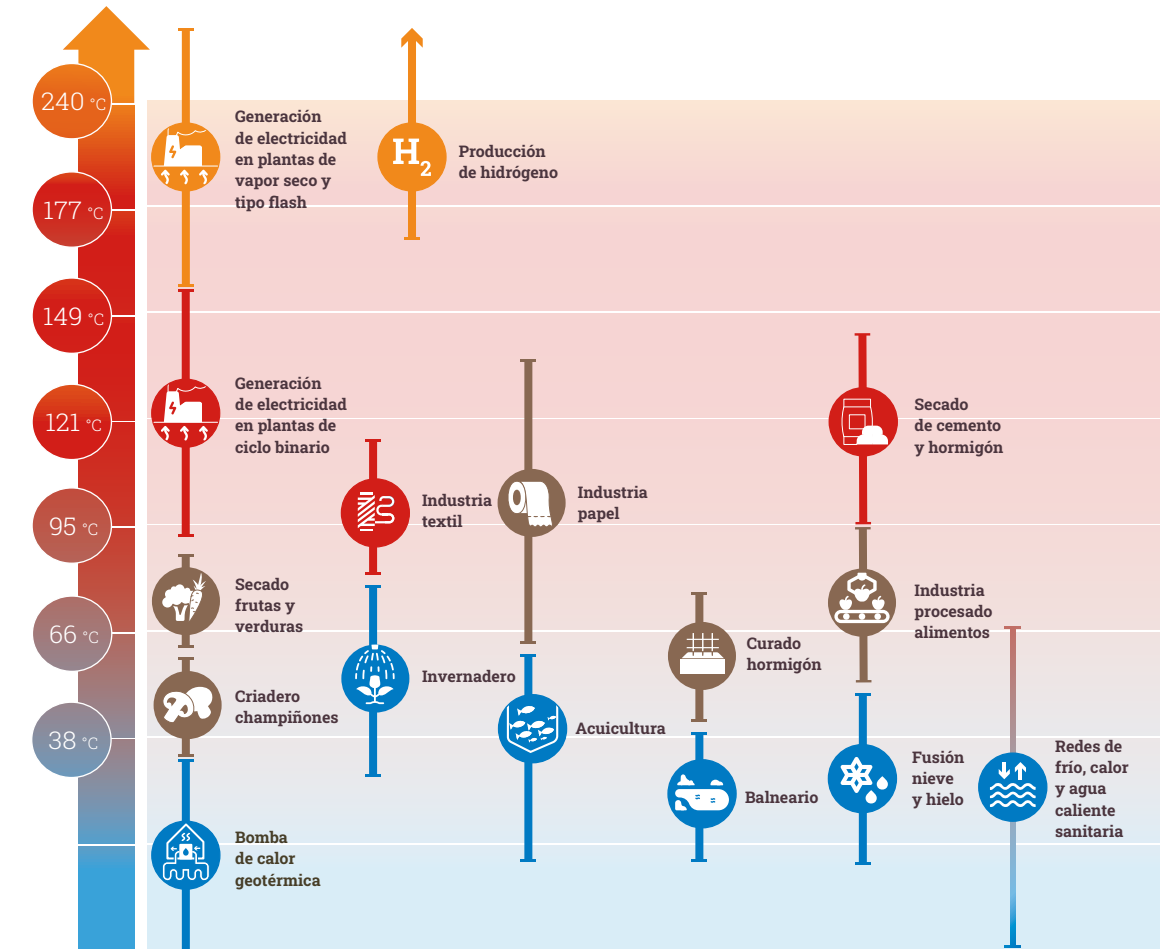
Investigación integral en energía geotérmica somera

EL CSIC impulsa una investigación integral en energía geotérmica somera que abarca desde el conocimiento científico de base hasta su aplicación práctica, con un fuerte compromiso con la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la protección ambiental. Este enfoque permite aprovechar el calor constante del subsuelo como fuente renovable para lograr una climatización eficiente, sobre todo en entornos urbanos densos, y posiciona al CSIC como un actor clave en la transición energética.

En el ámbito de la ciencia fundamental, los equipos del CSIC desarrollan metodologías avanzadas para caracterizar las propiedades térmicas, hidrogeoquímicas y geológicas del subsuelo urbano y periurbano. Estos estudios permiten entender el comportamiento del calor residual urbano, anticipar respuestas del medio ante nuevas demandas térmicas y diseñar estrategias de aprovechamiento geotérmico robustas, eficaces y sostenibles. Esta labor resulta esencial en un contexto en el que el calentamiento global está desplazando progresivamente la demanda energética de calefacción hacia la refrigeración, por lo que se requiere una planificación térmica adaptada a estos nuevos patrones climáticos. Por ello, una línea prioritaria de investigación del IGME se centra en anticipar los efectos del cambio climático sobre la demanda térmica. Comprender cómo responderá el subsuelo ante estos nuevos patrones es clave para asegurar la eficacia y durabilidad de las instalaciones, así como para evitar impactos acumulativos en el balance térmico urbano.

Desde la ciencia aplicada, el CSIC ha desarrollado modelos numéricos urbanos acoplados que simulan con precisión el transporte de calor en acuíferos urbanos, una herramienta clave para prevenir interferencias térmicas entre instalaciones. A través del IGME, el CSIC ha sido pionero en la instalación y análisis de **intercambiadores geotérmicos en coladas volcánicas** en Canarias (La Palma y Gran Canaria), así como en la puesta en marcha del primer observatorio geotérmico de España, ubicado en Zaragoza, que permite monitorizar en tiempo real la evolución térmica e hidrogeoquímica del subsuelo. Estas acciones se han traducido en múltiples publicaciones científicas sobre el funcionamiento de los acuíferos geotérmicos someros y los efectos del calor residual urbano, que contribuyen a una gestión más sostenible del recurso.

Figura 10 Relación entre la temperatura y los principales usos de la energía geotérmica



En términos de impacto y sostenibilidad, el CSIC también ha identificado un uso adicional de la energía geotérmica somera como **herramienta de biorremediación**. En acuíferos contaminados por compuestos orgánicos de origen antrópico —como fármacos, microplásticos o cosméticos—, que actúan como contaminantes emergentes con efectos adversos incluso a muy bajas concentraciones, el CSIC investiga cómo aprovechar la energía térmica para activar procesos bacterianos que ayuden a degradarlos. Esta línea de investigación, liderada por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), explora qué comunidades bacterianas son más eficaces según el tipo de contaminante presente en el acuífero, lo que permitiría combinar la reducción de emisiones de CO₂ derivadas de la climatización con la mejora directa de la calidad del agua subterránea.

En **zonas costeras**, el CSIC ha identificado que el uso de sistemas abiertos puede favorecer la intrusión salina en los acuíferos debido al bombeo de agua dulce y que incluso los sistemas cerrados pueden contribuir, en determinadas condiciones, al avance de la cuña salina al alterar la densidad del agua. Sin embargo, el mayor efecto adverso se encuentra en la zona de descarga del agua del acuífero al mar: si la descarga de agua calentada coincide con el verano, momento en el que las olas de calor marino son cada vez más frecuentes, los ecosistemas marinos sensibles a la temperatura recibirán un estrés adicional. En particular, la *Posidonia oceánica*, una planta acuática endémica del Mediterráneo, sufre una gran mortalidad a temperaturas superiores a 28 °C. Esta especie es crucial no solo para mantener la transparencia del agua y proteger las costas de la erosión, sino también por su papel como sumidero natural de carbono, por lo que su protección es clave para los objetivos climáticos y de conservación. Para mitigar el efecto adverso del calentamiento producido por la energía geotérmica, el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) ha propuesto una metodología del diseño de los proyectos de energía geotérmica somera en zonas costeras para conseguir que el agua subterránea enfriada durante el invierno se descargue al mar durante el verano, de forma que se minimice la afectación a los ecosistemas marinos. La incorporación de esta metodología de diseño en la legislación contribuiría a una integración de la energía geotérmica somera en zonas litorales segura para el medioambiente.

En materia de **transferencia de conocimiento**, el CSIC participa activamente en la elaboración de herramientas y materiales formativos orientados a profesionales, Administraciones y ciudadanía. Destacan publicaciones como el libro técnico *Shallow Geothermal Energy: Theory and Application*, disponible también en español, así como guías técnicas, monografías y materiales didácticos dirigidos a actores clave del sector. Además, el CSIC ha contribuido al informe técnico «ITP 02-2022. Tecnologías de redes de energía térmica de baja y muy baja temperatura», impulsado por la Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética (PTE-ee), en el que el IGME presentó el papel de la energía geotérmica somera como vector de generación y almacenamiento térmico en redes de 5.ª generación.

En paralelo, la **comunicación social** es una línea prioritaria, pues una de las principales barreras para el despliegue de esta tecnología en España es su escaso reconocimiento entre la ciudadanía y los gestores públicos. Para revertir esta situación, el CSIC participa en la colección ¿Qué Sabemos De...?, con un volumen divulgativo sobre energía geotérmica todavía en preparación, y desde hace años interviene activamente en el Catálogo de Conferencias Científicas del CSIC. Además, a través de charlas en centros educativos y ferias científicas de varias comunidades autónomas, los investigadores del CSIC promueven el conocimiento temprano de esta fuente renovable entre el alumnado, con una acogida muy positiva.

Desde el punto de vista regularizador, el CSIC ha desempeñado un papel importante en el **desarrollo normativo** de esta tecnología. El IGME ha participado en la redacción de la primera norma UNE sobre la energía geotérmica en España (UNE 100715-1:2014), centrada en los sistemas de circuito cerrado vertical, y en la actualidad trabaja en la propuesta de dos nuevas partes de la norma para abordar los sistemas de circuito abierto y las cimentaciones termoactivas, esenciales en entornos urbanos. Asimismo, el CSIC colabora con el MITECO y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en el diseño de estrategias de exploración, además de participar en el programa nacional de exploración geotérmica.



En el ámbito internacional, el IGME forma parte de EuroGeoSurveys (Asociación de Institutos Geológicos de la Unión Europea) y participa en el proyecto europeo Geological Service for Europe (GSEU) liderando la realización del atlas paneuropeo de capacidades geoenergéticas sostenibles (*Pan-European Atlas of Sustainable Geo-Energy Capacities*), en el que se incluye cartografía específica del potencial geotérmico somero. También ha participado en iniciativas europeas clave, como el Managing Urban Shallow Geothermal Energy (MUSE), financiado por el programa ERA-NET, y la «Acción CA18219 – Research network for including geothermal technologies into decarbonized heating and cooling grids (Geothermal-DHC)», del Programa de Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (COST), ambos centrados en la integración de la energía geotérmica en redes urbanas de climatización. Tanto el atlas paneuropeo como los resultados de MUSE están disponibles a través de la plataforma de la Infraestructura Europea de Datos Geológicos (EGDI).

Como ejemplo de liderazgo en cooperación científica, el IGME participa también en el grupo de expertos de geotermia de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI), y lidera la Red de Investigación e Innovación Geotérmica para Portugal y España (Geo-RIN), una comunidad abierta que conecta investigadores, empresas e instituciones públicas con el objetivo de acelerar el despliegue de la energía geotérmica en la península ibérica. Además, el IGME representa al CSIC en la Plataforma Española Tecnológica y de Innovación en Geotermia (GEOPLAT), que conecta a todos los agentes público-privados que vertebran el sector nacional de la geotermia.

Además, se utilizan **técnicas de sismica pasiva**, basadas en la escucha continua del ruido natural del subsuelo, para detectar zonas con potencial geotérmico, identificar acumulaciones de fluidos supercríticos y mapear las estructuras geológicas más relevantes. Un ejemplo destacado es el trabajo del GEO3BCN, que aplica estas técnicas para monitorear la evolución de los sistemas hidrotermales durante su explotación. A medida que se extrae agua caliente, la presión disminuye y puede producirse un cambio de fase de líquido a vapor, lo cual afecta a las velocidades sísmicas, que disminuyen de forma significativa. El análisis del ruido sísmico permite estimar la cantidad de vapor presente y, con ello, ayudar a los operadores a decidir si es conveniente reinyectar agua para mantener la presión. Este tipo de seguimiento es esencial para optimizar la eficiencia de los sistemas y garantizar su sostenibilidad.

Paralelamente, el GEO3BCN utiliza diversos métodos geofísicos junto con análisis volcano-estructurales para cartografiar fallas y manifestaciones hidrotermales en superficie, y determinar sus características térmicas y su origen. Esta información se combina con datos de geofísica profunda para localizar los reservorios, caracterizar las rocas encajantes y modelar el ascenso de fluidos y las zonas de recarga meteórica. Todos estos conocimientos se integran en el **desarrollo de mapas del potencial geotérmico**, que permiten identificar las zonas más idóneas para el desarrollo de proyectos tanto en la península ibérica como en regiones volcánicas, lo que contribuye a un aprovechamiento diversificado y seguro de la energía geotérmica profunda.

Durante la operación, el aprovechamiento geotérmico puede producir pérdida de fluido, subsidencias o acumulación de gases. Por ello, el CSIC trabaja en **sistemas avanzados de monitorización** térmica, geoquímica y geomecánica que permiten hacer un seguimiento continuo del estado del subsuelo y evaluar en tiempo real la evolución del reservorio. Estas herramientas se complementan con modelos numéricos acoplados —de amplio reconocimiento internacional— que simulan con alta precisión la distribución de temperatura, presión y circulación de fluidos, de forma que se optimiza el diseño de los sistemas y se reducen los riesgos operativos. En este contexto, el IMEDEA y el IDAEA han demostrado en diversos estudios en acuíferos calientes pro-

fundos que, aunque la alta permeabilidad del medio reduce inicialmente el riesgo de sismicidad inducida, el enfriamiento progresivo de la roca puede llegar a desestabilizar fallas situadas a cierta distancia del pozo. Este hallazgo resulta fundamental para reforzar los **protocolos de seguimiento sísmico** a medio y largo plazo.

Controlar la sismicidad inducida sigue siendo uno de los principales retos científicos en el desarrollo de la energía geotérmica profunda. En el ámbito de los sistemas geotérmicos mejorados (EGS), el CSIC acumula una larga trayectoria en el estudio del **transporte de calor en redes de fracturas** y en la **comprensión y mitigación de la sismicidad inducida**. Su investigación ha contribuido a la comprensión de la sismicidad postinyección, un fenómeno que puede activarse tras cesar la inyección de fluido y afectar a fallas que permanecían estables durante la operación. Este fenómeno resulta contraintuitivo, ya que la disminución de presión tras finalizar la inyección debería aumentar la estabilidad del sistema de fallas. Sin embargo, el análisis de casos como el de Basilea (Suiza) ha permitido identificar el rol estabilizador de la expansión de la roca inducida por la presión de inyección y cómo su desaparición repentina puede desestabilizar el sistema. Asimismo, se ha observado que la interacción entre terremotos puede influir en la evolución del sistema durante la estimulación.

Gracias a la comprensión de estos mecanismos, el CSIC ha **desarrollado herramientas de previsión sísmica** que permiten definir estrategias óptimas para la estimulación y el cese de la inyección con el fin de reducir el riesgo de terremotos. Estas herramientas numéricas permiten incorporar redes de fracturas y fallas en los modelos y han sido aplicadas en entornos experimentales, como los ensayos en el laboratorio subterráneo de Bedretto (Suiza) o en el análisis del proyecto EGS de Pohang (Corea del Sur), donde se produjo el mayor terremoto inducido registrado (magnitud 5,5). En este último caso, se concluyó que limitar la presión máxima de inyección es una medida esencial para mitigar el riesgo sísmico. Además, el CSIC ha elaborado una **base de datos global de casos de sismicidad inducida** que incluye las propiedades físicas de las rocas en cada escenario, lo que permite avanzar en la identificación de los factores que explican estos fenómenos.

Como alternativa a la estimulación hidráulica de fracturas naturales, se ha propuesto el uso de sistemas de circuito cerrado en forma de U (conocidos como *closed-loop geothermal systems*), en los que no circula fluido a través de la roca, lo que reduce significativamente el riesgo sísmico. A pesar de que algunas empresas que desarrollan este método han conseguido captar centenas de millones en inversión, existían dudas sobre su viabilidad para generar electricidad de forma rentable. Mediante diferentes modelos numéricos, el CSIC ha mostrado que, para mantener pérdidas térmicas bajas, es necesario operar a caudales reducidos, lo que solo es posible mediante la perforación de decenas de pozos profundos y paralelos. Si bien es técnicamente factible, el coste de cada perforación limita su escalabilidad y hace inviable su aplicación comercial a gran escala en la actualidad.

En la actualidad, el CSIC investiga un nuevo concepto de EGS que no se basa en la estimulación de fracturas preexistentes, sino en la creación de una red de fracturas mediante fracturación hidráulica controlada de la roca. Este concepto innovador se ha probado con éxito en un proyecto piloto y actualmente se encuentra en desarrollo un proyecto a gran escala en Utah (Estados Unidos), con una potencia estimada de 500 MW, equivalente a una central térmica de ciclo combinado, pero sin emisiones asociadas de CO₂ a la atmósfera. A pesar de su gran potencial, este enfoque plantea desafíos que el CSIC está investigando, como la posible generación de sismicidad si las nuevas fracturas interactúan con fallas preexistentes o si el enfriamiento progresivo de la roca afecta a estructuras más distantes.

El CSIC ha sido **pionero en el estudio del riesgo sísmico asociado a sistemas geotérmicos supercalientes**. A pesar de que los cambios de presión en estos entornos pueden ser limitados —debido a la baja viscosidad del agua supercrítica—, el fuerte gradiente térmico entre el fluido inyectado y la roca produce una redistribución de tensiones que pueden activar fallas en el largo plazo. Estas observaciones refuerzan la necesidad de desarrollar estrategias de inyección que reduzcan el impacto térmico y prolonguen la vida útil de estos proyectos, que tienen el potencial de multiplicar por diez la producción eléctrica por pozo en comparación con los sistemas convencionales.



La **colaboración con el sector privado** y la **transferencia del conocimiento** son claves para el CSIC. A este respecto, el CSIC ha colaborado con empresas en estudios de preevaluación técnica en proyectos en Canarias y otros países de Europa, incluidas modelizaciones numéricas de flujo multifase y transporte de calor. Estos estudios permiten reducir riesgos en las fases iniciales de exploración, aumentar la eficiencia operativa y facilitar el acceso a ayudas europeas a través del IDAE. La contribución del CSIC se traduce en una mayor viabilidad de proyectos renovables en regiones insulares con elevado coste energético.

El CSIC también lidera y participa en **proyectos de investigación internacionales** como el Predicting Earthquakes Induced by Fluid Injection (GEOREST), financiado por el Consejo Europeo de Investigación (ERC-Starting Grant), centrado en el desarrollo de metodologías para predecir y mitigar la sismicidad inducida mediante el acoplamiento de procesos térmicos, hidráulicos, mecánicos y sísmicos. También ha participado en el proyecto Analysis and Risk Mitigation Measures for Induced Seismicity in Supercritical Geothermal Systems (ARMISTICE), financiado por las Acciones Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowships (MSCA-IF); en el Zonal Isolation, Drilling and Exploitation of EGS projects (ZoDrEx), financiado por GEOTHERMICA-ERA-NET Cofund, y en diversos proyectos nacionales que desarrollan instrumentación especializada e información clave para comprender el comportamiento del subsuelo ante inyecciones térmicas o hidráulicas.

En este ámbito, también se enmarcan los proyectos financiados por el Programa Momentum liderados por el IDAEA y el GEO3BCN, que desarrollan herramientas de gestión y optimización de recursos geotérmicos profundos basadas en inteligencia artificial y modelización numérica, con el objetivo de mejorar la toma de decisiones para el desarrollo de proyectos. Además, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, como parte del proyecto europeo GSEU, lidera el atlas paneuropeo de capacidades energéticas sostenibles, en el que se están realizando, por primera vez en Europa, mapas europeos de potencialidad geotérmica profunda empleando la aproximación por *geothermal plays* e incluyendo el cálculo del flujo de calor para los reservorios caracterizados. Por otro lado, el CSIC también contribuye a acercar el conocimiento científico a la sociedad gracias a la **divulgación** mediante iniciativas como What on Earth?! Geociencias para Mentes Curiosas.

En el plano institucional, el CSIC colabora con el MITECO, el IDAE y GEOPLAT aportando conocimiento experto para el diseño de estrategias nacionales de exploración geotérmica y el desarrollo normativo. A escala europea, participa en el grupo de expertos de geoenergía (en el que se incluye la geotermia) de EuroGeoSurveys, equipo de consulta de la Comisión Europea con una iniciativa orientada a consolidar una base común de conocimiento que refuerce la planificación energética y la seguridad del suministro en Europa, además de participar en acciones conjuntas con el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC).

2.3.

Desarrollo de cadenas de valor en captura y almacenamiento de dióxido de carbono

El CSIC participa en todas las etapas de la cadena de valor del sistema de CCS, desde el desarrollo de tecnologías avanzadas de captura en el ámbito industrial hasta un liderazgo destacado en investigación, evaluación y seguimiento del almacenamiento geológico de CO₂.

En el ámbito de la **captura**, el CSIC ha sido pionero en el desarrollo y la implementación de tecnologías avanzadas, incluida la demostración en estadio piloto y semicomercial (nivel de madurez tecnológica 7) de la tecnología *calcium looping* por parte del Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR) de Oviedo. Este proceso se basa en ciclos de carbonatación y calcinación que utilizan óxidos de calcio para capturar el CO₂. En 2008, se instaló una planta piloto de esta tecnología de 30 kilovatios térmicos (kW_t) y, en 2012, entró en funcionamiento una planta de captura de 1,7 MW_t que trata un 1 % de los gases de combustión de una central térmica de 50 MW_e. Esta planta de captura pertenece a un consorcio formado por el CSIC, HUNOSA y Endesa.

El grupo de captura de CO₂ del INCAR ha participado en más de 15 proyectos europeos basados en la tecnología *calcium looping*. Además, el INCAR investiga en tecnologías de captura de CO₂ a baja temperatura mediante adsorción con sólidos derivados de biomasa utilizando dos plantas experimentales con lechos fijos capaces de operar bajo diferentes condiciones de presión y temperatura. También estudia procesos de oxidación de biomasa, para lo cual dispone de un combustor de flujo en arrastre que puede alcanzar hasta 1500 °C.

El Instituto de Carboquímica (ICB) de Zaragoza también ocupa un lugar prominente en el desarrollo de la tecnología de captura de CO₂ con transportadores sólidos de oxígeno (*chemical looping combustion*), que permite obtener corrientes prácticamente puras de CO₂ listas para su transporte y almacenamiento. Dispone de varias plantas piloto, incluidas una de 50 kW_t para combustibles sólidos y otra de 10 kW_t para gases, además de instalaciones para estudiar oxidación y oxihidrocombustión de biomasa.

Por su parte, el Instituto de Tecnología Química (ITQ) de Valencia ha participado en cinco proyectos europeos y tres nacionales centrados en el desarrollo de materiales y membranas inorgánicas basadas en óxidos mixtos para su uso en procesos de oxidación. Asimismo, ha participado en el proyecto HYMET, orientado a reducir las emisiones en la industria siderúrgica mediante el uso de hidrógeno verde y tecnologías de captura, con desarrollos piloto para la producción de hierro con bajas emisiones.

Por otro lado, el trabajo del CSIC en **almacenamiento geológico de CO₂** combina enfoques multiescalares y metodologías complementarias que abarcan desde la caracterización de formaciones geológicas hasta el diseño de nuevas estrategias de almacenamiento que reducen el riesgo de fugas de CO₂.

En primer lugar, el CSIC es un referente mundial en el asesoramiento de la sismicidad inducida mostrando el **bajo potencial que el almacenamiento geológico de CO₂ posee para inducir terremotos**. Este bajo riesgo es clave de cara a la implementación exitosa de la CCS a la escala necesaria para alcanzar los objetivos climáticos. Para el estudio de la sismicidad, el CSIC ha desarrollado soluciones analíticas y numéricas que acoplan el flujo multifase con la respuesta geomecánica de las rocas almacén y sello, y la estabilidad de fallas. Además, el CSIC ha sido **pionero en el estudio de los efectos térmicos** sobre la integridad de la roca sello. Estos estudios se complementan con la caracterización geológica multiescalar y su validación experimental son elementos clave. Asimismo, el CSIC ha desarrollado metodologías de caracterización a diferentes escalas, desde muestras de roca analizadas en laboratorio, pasando por laboratorios de roca a escala real, hasta ensayos de campo y estudios a escala de cuencas sedimentarias. Estas capacidades se aplicaron con éxito, por ejemplo, en la caracterización del emplazamiento piloto de Hontomín (Burgos), desarrollado por CIUDEN, cuyas actividades de caracterización fueron participadas por el GEO3BCN, el IGME, el IDAEA y el Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT).

En este ámbito, el IMEDEA ha modelado experimentos de laboratorio, lo que ha permitido identificar procesos del flujo de CO₂ no detectados con anterioridad, sobre todo en fracturas. Por otro lado, el CSIC ha liderado la propuesta de un ensayo a largo plazo para caracterizar los cambios en las propiedades geomecánicas de la roca sello debido a las reacciones geoquímicas, conocido como CO₂ Long-term Periodic Injection Experiment (CO₂LPIE). Este ensayo, actualmente en curso en el laboratorio subterráneo de Mont Terri (Suiza), consiste en la inyección de agua con dióxido de carbono disuelto en la roca *Opalinus Clay* (arcilla opalina), candidata para ser roca sello. El diseño de este ensayo ha dado lugar a nuevas metodologías de caracterización continua que permiten actualizar las propiedades de la roca en función de su evolución frente a la interacción con el CO₂.

Además, el IGME lidera la elaboración del **atlas paneuropeo de potencial de almacenamiento geológico de CO₂**, un documento que cubre el espacio europeo e identifica formaciones, unidades y trampas potenciales —con un detalle variable según el nivel de conocimiento—, y calcula su capacidad estimada. Este atlas emplea el método denominado *storage readiness level* (SRL), mediante el cual se indica el grado de madurez en el conocimiento de las trampas, y actualiza los trabajos desarrollados en los proyectos EU GeoCapacity y Assessment of the CO₂ Storage Potential in Europe (CO₂Stop), en los que también participó el IGME. Este documento será la base del conocimiento geológico del denominado *European investment atlas of potential CO₂ storage sites*, una herramienta que la Comisión Europea ofrecerá para impulsar las tecnologías CCS a gran escala y alcanzar los compromisos de cero emisiones netas en 2050.

En paralelo a estos esfuerzos de cartografía del continente, diversos proyectos europeos han contribuido a reforzar el conocimiento aplicado sobre la viabilidad del almacenamiento geológico de CO₂, su integración en clústeres industriales y su implementación en el contexto ibérico. Entre los más relevantes destacan PilotSTRATEGY, STRATEGY CCUS y el proyecto Integrated Infrastructure for CO₂ Transport and Storage in the West Mediterranean (COMET), que comparten el objetivo de evaluar la viabilidad técnica, económica y social de la CCS en el sur de Europa. Estos proyectos han abordado la caracterización detallada

de estructuras geológicas, la modelización estática y dinámica, la definición de planes de desarrollo regional y la elaboración de herramientas para la evaluación tecnoeconómica de clústeres industriales.

En España, las actividades se han centrado en la caracterización de potenciales emplazamientos en Aragón y en el análisis de posibles redes de transporte transfronterizas con Portugal y Marruecos. Otros proyectos de interés, como el Enabling Onshore CO₂ Storage in Europe (ENOS), han demostrado la seguridad y viabilidad ambiental del almacenamiento geológico de CO₂ mediante pilotos de campo en distintos contextos geológicos, incluido el emplazamiento español de Hontomín (Burgos). Por su parte, el proyecto CO₂-based Electrothermal Energy and Geological Storage System (CEECS) explora el uso del CO₂ como fluido de almacenamiento energético temporal, combinando almacenamiento geológico y energético en una aproximación innovadora con un alto potencial de desarrollo tecnológico.

Asimismo, el CSIC contribuye de manera estratégica al desarrollo del almacenamiento geológico de CO₂ a través de su **participación activa en redes científicas e institucionales**, clave para la planificación energética europea y global. A través del IGME, forma parte de CO₂GeoNet (creada como una red europea de excelencia para el almacenamiento geológico de CO₂) y Euro-GeoSurveys, y colidera el grupo de expertos en almacenamiento geológico de CO₂. Ambas son redes de referencia para la Dirección General de Acción por el Clima (DG CLIMA) de la Comisión Europea y actúan como órganos de consulta para la implementación de políticas como el reglamento sobre la industria de cero emisiones netas (*Net Zero Industry Act*), pieza central del marco normativo europeo en materia de descarbonización industrial. También es miembro del grupo de trabajo de CCS de la Alianza Europea para la Investigación en el Sector Energético (EERA) y del Implementation Working Group 9 (IWP9) del SET Plan, dedicado al almacenamiento geológico de CO₂ en el marco de la estrategia tecnológica de la Comisión Europea.

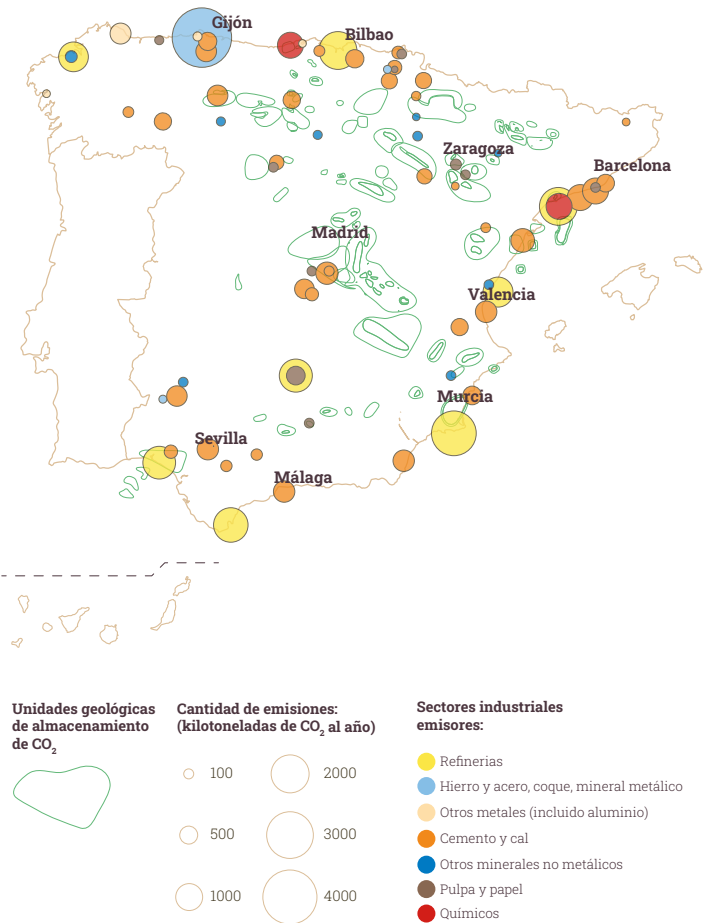
En el plano nacional, el CSIC ha realizado importantes contribuciones a la **cartografía del potencial de almacenamiento**, con lo que ha liderado en España la identificación y caracterización

de estructuras geológicas con capacidad para almacenar CO₂. El IGME sentó las bases del conocimiento nacional con el atlas de estructuras con potencial de almacenamiento (de su Plan de Almacenamiento Geológico de CO₂ o proyecto ALGECO2), que identificó 103 estructuras terrestres, priorizadas según criterios geológicos y geofísicos, y que es accesible en abierto. Esta labor fue ampliada en el proyecto SEASTORAGE (2022-2024), que incluyó nuevas estructuras marinas y culminó en un nuevo atlas publicado en 2025 dentro del proyecto paneuropeo GSEU y alojado en la plataforma EGDI. Este atlas incorpora criterios homogéneos para toda la Unión Europea. Además, el IGME gestiona la litoteca nacional, que preserva testigos, registros y documentación clave para evaluar almacenes potenciales en el subsuelo español, así como la base de datos del subsuelo de nuestro país (documentos, diagrfías, líneas sísmicas, informes de perforación, etc.), que son la clave para el conocimiento del subsuelo.

Sobre esta **base cartográfica y de caracterización**, el CSIC ha desarrollado metodologías avanzadas para la selección de emplazamientos óptimos que integran criterios geológicos, económicos, de seguridad e ingeniería mediante enfoques multicriterio. El GEO3BCN ha implementado estas metodologías con éxito, por ejemplo, en el mar del Norte. En el contexto español, un estudio conjunto del GEO3BCN, el IDAEA, el IMEDEA, el INCAR y el IGME propuso una **estrategia nacional basada en clústeres regionales de almacenamiento** para identificar emplazamientos próximos a grandes focos emisores industriales. Esta propuesta permitiría reducir significativamente los costes logísticos y de infraestructuras, y podría contribuir a abatir hasta un 21 % de las emisiones industriales del país.

Desde una perspectiva más global, investigadores del GEO3BCN han analizado cómo el despliegue de la CCS se concentra en países con mayor renta y experiencia en producción de petróleo y gas, lo que plantea importantes **desafíos en términos de equidad**. Esta concentración de capacidades técnicas, económicas y regulatorias podría dificultar la participación de países menos desarrollados, perpetuar desigualdades en el acceso a las tecnologías de mitigación y obstaculizar la cooperación internacional necesaria para alcanzar los objetivos climáticos globales.

Figura 12 Mapa de las principales fuentes industriales de emisión de CO₂ y de la localización de almacenes geológicos potenciales



Este posicionamiento estratégico se complementa con una intensa actividad del CSIC en el **acompañamiento a la industria** y al diseño de proyectos reales de almacenamiento. Desde hace más de dos décadas, el IGME ha participado en numerosos proyectos europeos centrados en la caracterización de estructuras, el desarrollo tecnológico y la planificación de infraestructuras de almacenamiento: STRATEGY CCUS, que evaluó el potencial de almacenamiento en la cuenca del Ebro y desarrolló estudios de viabilidad para clústeres en Tarragona y Barcelona; PilotSTRATEGY, con caracterización detallada de la estructura de Lopín (Zaragoza); ENOS, centrado en el estudio de la sismicidad inducida en Hontomín (Burgos); o Assuring Integrity of CO₂ Storage Sites Through Ground Surface Monitoring (SENSE), que aplicó tecnologías InSAR a la detección de alteraciones en almacenes de CO₂ también en Hontomín. Todos estos proyectos han incluido estudios sobre la aceptación social, la participación ciudadana y la difusión científica a no expertos de los distintos aspectos del almacenamiento geológico.

Esta **transferencia de conocimiento** también ha tenido un impacto directo en sectores industriales estratégicos. Por ejemplo, el IGME ha colaborado con la agrupación de fabricantes de cemento en España Oficemen para evaluar el **potencial de almacenamiento y definir clústeres regionales** que permitan reducir las emisiones de un sector considerado de difícil abatimiento. En paralelo, el IDAEA ha participado en cinco proyectos europeos sobre almacenamiento de CO₂ y ha liderado el proyecto «Mixing in heterogeneous media across spatial and temporal scales: from local non-equilibrium to anomalous chemical transport and dynamic uncertainty» (MHetScale) mediante una ayuda Consolidator Grant del Consejo Europeo de Investigación (ERC) en esta misma temática. Además, el IDAEA forma parte de un consorcio internacional puntero en el ámbito del proyecto Multiscale Pressure-Stress Impacts on Fault Integrity for Multi-site Regional CO₂ Storage (MuPSI), cofinanciado por CETPartnership, sobre el desarrollo seguro y eficiente del almacenamiento de CO₂ a escala regional. Asimismo, el IMEDEA coordina la red de doctorado de las Acciones Marie Skłodowska-Curie (MSCA-DN) SMILE y ha liderado la ayuda Starting Grant del proyecto GéoREST y las pruebas de concepto (*proof of concept*) del proyecto Carbon Dioxide (CO₂) Storage in Deep Volcanic Areas (CO2SINK) y del proyecto

a New Paradigm for Forecasting Injection-induced Earthquakes (NOSHAKE) del ERC, con lo que se contribuyó a la formación de una nueva generación de expertos en la reducción de los riesgos asociados al almacenamiento geológico de carbono.

Esta trayectoria científica y técnica se traduce también en una sólida capacidad de **asesoramiento institucional y apoyo a la elaboración de políticas públicas nacionales**. El CSIC participa en la Plataforma Tecnológica Española del CO₂ (PTECO2), en la que ocupa una vicepresidencia y contribuye activamente a sus grupos de trabajo y actividades de divulgación. En el plano regulatorio, el IGME ha desempeñado un papel clave en la trasposición de la Directiva CCS, sobre almacenamiento geológico de CO₂, a la legislación española (Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono) y participa en la actualidad en los grupos de trabajo para la revisión de las guías técnicas de aplicación. Además, la legislación española establece que la concesión de un permiso de explotación de un almacén de CO₂ requiere una evaluación técnica positiva del IGME, lo que convierte al CSIC en un agente clave para garantizar la seguridad y viabilidad de esta tecnología en nuestro país.

2.4.

Liderazgo en la investigación aplicada y multidisciplinar en el almacenamiento subterráneo de energía

EL CSIC impulsa una investigación aplicada y multidisciplinar orientada a garantizar la viabilidad técnica, la seguridad operativa y la sostenibilidad ambiental del almacenamiento subterráneo de energía, un componente estratégico para alcanzar los objetivos de descarbonización y autonomía energética en Europa. Esta línea de trabajo incluye tanto el almacenamiento geológico de vectores energéticos como el almacenamiento subterráneo de calor, con especial atención a su integración en entornos urbanos e industriales.

En el caso de vectores energéticos como el hidrógeno o el aire comprimido, las actividades del CSIC abarcan desde la **caracterización de formaciones almacén** (mediante técnicas geofísicas, petrofísicas y geoquímicas) hasta el **modelado de procesos multifásicos** que permiten predecir el comportamiento del gas inyectado en condiciones de presión y temperatura elevadas. Además, se trabaja activamente en la evaluación de riesgos, como fugas, reacciones químicas o sismicidad inducida, así como en el desarrollo de tecnologías avanzadas de **monitoreo** para el seguimiento en tiempo real de las operaciones. Estas líneas de investigación se complementan con estudios sobre la interacción del gas con los materiales geológicos, la compatibilidad con infraestructuras existentes y el análisis tecnoeconómico de distintas configuraciones de almacenamiento, lo que consolida el papel del CSIC como actor clave en el desarrollo seguro y eficiente de estas tecnologías.

Un ejemplo destacado de esta labor es el estudio colaborativo en el que participó el GEO3BCN, junto con otras instituciones punteras europeas, que culminó en una publicación seminal sobre los principales retos científicos del almacenamiento subterráneo de hidrógeno. El trabajo identifica aspectos críticos como la hidrogeología, la geomecánica, la geoquímica y la actividad microbiana, y subraya la necesidad de adoptar **enfoques altamente multidisciplinarios** para entender estos sistemas de almacenamiento. Esta visión integradora posiciona al **CSIC como referente europeo** en la investigación del almacenamiento geológico en medios porosos.

Por otro lado, el GEO3BCN y el IMEDEA colaboran, en el ámbito del proyecto europeo SHINE, financiado por la MSCA-DN, en el análisis de **la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en acuíferos salinos**, teniendo en cuenta su baja densidad y alta flotabilidad. Una línea prioritaria en este contexto es la evaluación de los efectos de la ciclicidad de inyección y extracción sobre la estabilidad de la roca sello y el riesgo de sismicidad inducida mediante el uso de técnicas avanzadas de modelado numérico e inteligencia artificial. A partir del análisis del caso Castor, el CSIC identificó un mecanismo de inducción sísmica asociado a la flotación del gas que podría ser aún más relevante para el almacenamiento de hidrógeno, cuya densidad es diez veces menor que la del gas natural. En la actualidad, se investigan las condiciones bajo las cuales esta fuerza de flotación podría generar sismicidad, con implicaciones directas para el diseño y la regulación de futuras instalaciones.

En paralelo, el IDAEA ha estudiado los efectos geoquímicos de la inyección de hidrógeno en cavernas salinas y ha aportado conocimiento clave sobre la integridad química del medio almacenador. Esta línea de investigación se complementa con el desarrollo, por parte del GEO3BCN, de la primera **base de datos de estructuras salinas de la península ibérica (IESDB)**, herramienta actualmente utilizada para evaluar el potencial de almacenamiento de hidrógeno de estas estructuras y facilitar la toma de decisiones técnicas y políticas.

Por su parte, el IGME participa en dos proyectos pioneros de caracterización de pilotos de hidrógeno en España: el proyecto UNDERGY (2022-2025), que investiga el desarrollo en España de un almacenamiento estacionario en medio poroso de energía renovable mediante hidrógeno verde y la integración en una red inteligente de la generación renovable y el almacenamiento estacional de energía de alta capacidad (TWh); y el proyecto UES-365 (2023-2026), en el que se definen las bases tecnológicas para aumentar la competitividad del almacenamiento estacionario en el subsuelo de energía procedente de fuentes renovables mediante el uso de aire comprimido, biogás e hidrógeno verde como vectores en cavidades salinas. Además, ha participado en el proyecto Hydrogen Storage In European Subsurface (HyStorIES) (2021-2023), que incluye la elaboración del **primer atlas europeo**

de potencial de almacenamiento de hidrógeno. Esta iniciativa abarcó diversas actividades clave: el estudio de la viabilidad técnica del subsuelo para un futuro almacenamiento de hidrógeno; la adición de características relevantes para el almacenamiento de este gas en bases de datos de yacimientos a escala europea; la modelización geoquímica y de yacimientos para casos representativos del subsuelo europeo, y pruebas de esta representatividad comparadas con resultados obtenidos con modelos de sitios de almacenamiento reales. Por último, abarcó un extenso programa de experimentos de laboratorio microbiológico y de muestreo para cubrir una variedad de condiciones posibles.

Asimismo, el CSIC cuenta con las capacidades científicas y técnicas necesarias para realizar estudios de **viabilidad tecnoeconómica** que evalúen la idoneidad y rentabilidad del almacenamiento subterráneo de hidrógeno. Estos análisis se desarrollarán con base en escenarios energéticos ya definidos en el plano europeo e irán acompañados de estudios preliminares de impacto ambiental y social, de manera que ofrecerán una base rigurosa para la toma de decisiones estratégicas por parte tanto de los Gobiernos como de la industria.

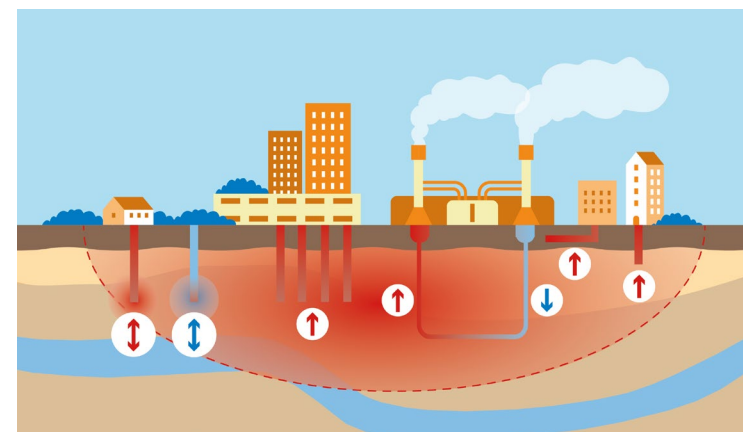
El CSIC también refuerza su impacto mediante la participación activa en **redes estratégicas** como el Comité Técnico RM4 del Hydrogen Europe Research, la Asociación Española del Hidrógeno o la red catalana H2CAT. Además, coordina y participa en proyectos de investigación punteros como el SHINE —una red europea para la formación de una nueva generación de geocientíficos especializados en almacenamiento geológico de hidrógeno—, así como en iniciativas nacionales —como Green-HUGS (IDAEA) y SOSGAS (GEO3BCN)— y europeas, como HyDRA (IDAEA), centradas en la seguridad, eficiencia y viabilidad de esta tecnología. Estas actividades consolidan al CSIC como una institución de referencia en Europa para el avance científico y tecnológico del almacenamiento geológico de hidrógeno.

Por otro lado, el almacenamiento subterráneo de calor representa otra vía clave para flexibilizar la demanda energética y reducir el uso de combustibles fósiles en la climatización. Por ello, el CSIC desarrolla investigaciones orientadas al **diseño y evaluación de sistemas de almacenamiento térmico estacional en acuíferos**,

una tecnología que permite almacenar excedentes de calor generados en verano —por fuentes renovables o por procesos industriales— para su uso posterior en invierno. Esta solución permite optimizar el rendimiento energético de edificios y distritos urbanos mediante la reducción de costes, emisiones y presión sobre las redes eléctricas.

Además, en entornos urbanos densamente poblados, el CSIC impulsa el desarrollo de proyectos piloto centrados en la reutilización del calor residual procedente de procesos industriales, centros de procesamiento de datos o del propio efecto isla de calor urbana. El objetivo **es integrar este calor en redes de climatización urbana mediante soluciones de almacenamiento térmico en el subsuelo** para lograr así a una planificación energética más sostenible. Estas tecnologías ofrecen una solución adecuada en especial para grandes áreas metropolitanas, ya que permiten **transformar un residuo térmico en un recurso útil** al tiempo que contribuyen a la mitigación del cambio climático y la adaptación al calentamiento urbano. De esta forma, el CSIC aporta no solo conocimiento técnico y científico, sino también soluciones concretas para una transición energética eficaz, equitativa y basada en el aprovechamiento inteligente del subsuelo.

Figura 13 Geotermia urbana: La recuperación del calor subterráneo bajo las ciudades como fuente de calor renovable y sostenible



tres

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El subsuelo constituye un **recurso estratégico para alcanzar la neutralidad climática**, con aplicaciones clave en climatización, generación de electricidad renovable fiable, almacenamiento de energía y descarbonización industrial. Su **aprovechamiento coordinado** puede contribuir decisivamente a la descarbonización del país.

En este documento se propone un **cambio de paradigma en la forma en la que la sociedad se relaciona con el subsuelo**, que supone superar su visión tradicional como fuente de recursos extractivos para pasar a asumir un papel activo y multifuncional en una economía baja en emisiones. Este nuevo enfoque implica no solo aprovechar sus capacidades técnicas, sino también considerarlo un recurso territorial esencial para avanzar hacia un modelo productivo y social más sostenible.

España cuenta con una base científica y técnica consolidada que permite abordar con solvencia los retos asociados con las tecnologías del subsuelo, lo que posiciona al país en un lugar destacado para **liderar el desarrollo sostenible de estas tecnologías**, siempre que se articulen mediante políticas integradoras, inversiones estratégicas y una regulación adecuada a su implantación progresiva y generalizada en el territorio.

La energía geotérmica somera es una solución renovable, no centralizada y altamente eficiente para la climatización de edificios y barrios. Su integración en entornos urbanos contribuye a reducir las emisiones del sector residencial, aliviar la presión sobre la red eléctrica y aprovechar mejor el calor residual. El retraso en su implantación en España no responde a limitaciones tecnológicas, sino al bajo nivel de conocimiento público, las barreras normativas y la escasa integración en las políticas de planificación energética y urbana. Superar estos obstáculos requiere marcos regulatorios claros, incentivos específicos y campañas de sensibilización que visibilicen sus beneficios ambientales, sociales y económicos.

Por su parte, **la energía geotérmica profunda representa una fuente de energía renovable estable, fiable y gestionable**, capaz de complementar otras tecnologías como la solar o la eólica en la producción limpia de electricidad. Su explotación eficiente exige un conocimiento detallado del régimen térmico y de la estructura del subsuelo, así como herramientas avanzadas de exploración y modelización. Las investigaciones del CSIC han mejorado la comprensión de riesgos como la sismicidad inducida por cambios de presión o el enfriamiento de la roca y han permitido proponer soluciones basadas en la caracterización, monitorización, simulación numérica y predicción. Es esencial que este conocimiento se incorpore en la normativa para reducir la incertidumbre y los riesgos, así como aumentar la viabilidad de los proyectos desde fases tempranas.



El **almacenamiento geológico de CO₂ es una tecnología esencial para alcanzar los objetivos climáticos**, sobre todo **en sectores industriales de difícil descarbonización** como el cemento, el acero o la refinería. Además, permite habilitar soluciones tecnológicas de **extracción neta de carbono de la atmósfera**, que serán necesarias para alcanzar emisiones negativas netas en la segunda mitad del siglo. España cuenta con una cartografía detallada del potencial de almacenamiento, desarrollada por el CSIC, y con herramientas para priorizar, seleccionar y caracterizar los emplazamientos más adecuados. La capacidad identificada es suficiente para cubrir las necesidades nacionales durante décadas, siempre que se desarrollen marcos regulatorios e infraestructuras adecuadas para su despliegue.



El almacenamiento geológico de energía permite utilizar los excedentes de energía renovable en periodos con una demanda superior a la producción de forma tanto diaria como estacional, lo que favorece su integración y mantiene la estabilidad de la red. **El almacenamiento de vectores energéticos como el hidrógeno convierten el subsuelo en la batería del mundo**, y esto permite gestionar grandes volúmenes de energía renovable y cubrir demandas industriales y estacionales reproduciendo el modelo actual de almacenamiento subterráneo de gas natural, pero con tecnologías limpias. **El almacenamiento térmico es una tecnología clave para la descarbonización de la climatización urbana** con potencial para transformar el calor residual en un recurso estratégico. Existen soluciones tecnológicamente maduras (ATES, BTES, CTES) en general implementadas en Europa, cuya adopción en España requeriría el impulso de proyectos de demostración y su inclusión explícita en las estrategias de descarbonización del sector térmico.

Recomendaciones

Para los decisores políticos:



La coordinación entre ciencia, política, sociedad e industria es clave para lograr un despliegue eficaz y legítimo del uso estratégico del subsuelo, sobre todo en un contexto de creciente presión climática y energética. Para ello, **es necesario reconocer el subsuelo como recurso crítico para la neutralidad climática** e integrarlo en las estrategias nacionales y regionales de planificación energética, urbana e industrial. En este marco, resulta imprescindible **definir hojas de ruta nacionales** alineadas con los hitos europeos de 2030, 2040 y 2050, que sirvan para priorizar inversiones, coordinar políticas públicas y dar certidumbre al sector privado. La falta de acción supondría una pérdida de competitividad frente a países como Islandia, Alemania o los Estados Unidos, que ya lideran estas tecnologías.



Para favorecer el despliegue de la energía geotérmica somera, sería necesario establecer un marco regulador claro, específico y coherente que minimice riesgos, permita sinergias para la mejora de la calidad de las aguas subterráneas y resuelva su encaje jurídico dentro de las legislaciones sobre aguas, minas, urbanismo y medioambiente. Asimismo, se requiere simplificar los procedimientos administrativos y técnicos asociados a su implantación, lo que incluye la posibilidad de establecer una ventanilla úni-

ca que agilice la tramitación y reduzca barreras burocráticas. **Esta tecnología debería integrarse activamente en la planificación energética y urbana** con objetivos cuantificables y planes de acción concretos. Su implantación en edificios públicos, programas de rehabilitación energética y comunidades energéticas térmicas puede marcar una diferencia significativa en la descarbonización del parque edificado.



España debe incorporar la energía geotérmica profunda en su mezcla energética para aumentar la estabilidad de la red eléctrica. Con el fin de desbloquear su potencial en España, es clave poner en marcha programas de exploración en zonas con indicios geológicos favorables, respaldados por convocatorias específicas de financiación como los llevados a cabo en Canarias en el año 2023 mediante el programa Geotermia Profunda, gestionado por el IDAE. Estas medidas deben facilitar la participación conjunta del sector público y privado. En paralelo, es urgente establecer protocolos de seguimiento obligatorios respaldados por la evidencia científica para garantizar la seguridad y sostenibilidad de los proyectos, que incluyan la monitorización sísmica, hidráulica, térmica, geomecánica y geoquímica, junto con obligaciones de transparencia, publicación de datos y protocolos claros de respuesta ante posibles impactos.



La gran distancia hasta los clústeres de almacenamiento del mar del Norte fuerza al desarrollo del **almacenamiento de CO₂ en territorio español, ya sea en tierra firme o en alta mar, para poder cumplir con los compromisos de reducción de emisiones y mantener el tejido industrial nacional**. En el contexto de la descarbonización industrial, los clústeres de CCS se han mostrado como una herramienta eficaz para iniciar el despliegue de la tecnología al reunir en un mismo marco a emisores, operadores de captura, transporte y almacenamiento, y al permitir infraestructuras compartidas que reducen costes y riesgos. Inspirándose en el ejemplo noruego de Northern Lights, España puede explorar la posibilidad de cofinanciar o incentivar las fases iniciales de transporte y almacenamiento de CO₂ y establecer marcos contractuales estables a largo plazo, de forma que se reduzca el riesgo para los operadores privados. Resulta igualmente relevante concebir el sistema como infraestructura común y multiciente, que no dependa de un único emisor y que permita integrar de forma progresiva distintas industrias nacionales y, en el futuro, conectarse a redes transfronterizas europeas, lo que situaría al país en una posición de referencia en la descarbonización en Europa.



El almacenamiento subterráneo de hidrógeno renovable debe concebirse como un componente estratégico dentro de la planificación energética del país para garantizar el suministro de energía renovable manteniendo la estabilidad de la red eléctrica. Para garantizar su compatibilidad con el despliegue de infraestructuras de producción, transporte y consumo, sería necesario profundizar en la cartografía nacional de estructuras geológicas aptas para su almacenamiento, así como promover proyectos demostrativos con seguimiento transparente y público que aporten evidencia técnica y contribuyan tanto a la aceptabilidad social como al desarrollo de una regulación eficaz.



Para fomentar el aprovechamiento del calor residual y la eficiencia térmica en entornos urbanos, conviene priorizar la puesta en marcha de **proyectos piloto de almacenamiento térmico subterráneo** (como ATES, BTES y CTES). Estas soluciones permiten equilibrar la oferta y la demanda térmicas estacionales y acelerar la integración de fuentes renovables sujetas a variabilidad. Además, el almacenamiento térmico debe incorporarse de forma explícita en las estrategias de climatización sostenible y eficiencia energética priorizando su despliegue en áreas con gran variabilidad térmica estacional o alta demanda térmica y apoyando su integración en redes de 5.^a generación.

Para las empresas (sector privado):



La energía geotérmica somera debería consolidarse como una solución estándar en proyectos de construcción, rehabilitación y urbanismo sostenible aprovechando su alto rendimiento energético y escaso impacto ambiental. Para ello, las empresas deben asumir un papel de liderazgo y establecer alianzas con centros de investigación a la vez que fomentan el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras, como intercambiadores geotérmicos, pilotes termoactivos o pavimentos térmicamente activos. Además, conviene fomentar proyectos integrados que combinen energía geotérmica y almacenamiento térmico subterráneo como base para redes de climatización inteligente. Por otro lado, para **mejorar la rentabilidad y reducir la incertidumbre de los proyectos de energía geotérmica profunda**, resulta clave invertir en herramientas de modelización numérica, sensores avanzados y técnicas de seguimiento en tiempo real que alimenten herramientas de apoyo a la toma de decisiones que reduzcan los riesgos. Estas tecnologías permiten optimizar la planificación, la operación y el mantenimiento de las instalaciones.



Para la industria, avanzar hacia la **neutralidad climática** no es solo una obligación legal, sino una **condición esencial para su viabilidad a largo plazo**, dadas las exigencias normativas de la Unión Europea y del marco español. Las empresas, especialmente aquellas con emisiones difíciles de abatir —como las del sector cementero, siderúrgico o químico—, deben **integrar tecnologías de mitigación como el almacenamiento geológico de CO₂ en sus estrategias climáticas**. En este contexto, la transparencia, la trazabilidad de los proyectos y una comunicación proactiva con la sociedad son fundamentales para generar confianza pública y facilitar la **aceptabilidad social** de estas soluciones. Las empresas deben facilitar esta comunicación para evitar percepciones de opacidad o riesgo no gestionado, que podrían generar rechazo social y bloquear iniciativas clave para la descarbonización.



Por último, el sector privado tiene un papel clave en la **validación técnica y operativa de nuevas formas de almacenamiento subterráneo de energía**. El almacenamiento térmico subterráneo ofrece ventajas económicas significativas para empresas con alta demanda energética, como industrias de procesos, centros logísticos o centros de procesamiento de datos. Su implicación en proyectos piloto y programas de investigación y desarrollo (I+D) es fundamental para acelerar la maduración tecnológica y adaptar las soluciones a diferentes contextos operativos.

|||||

Hacer visible lo invisible: el conocimiento ciudadano sobre los usos innovadores del subsuelo debe ser promovido activamente para fomentar un debate informado y una participación activa. Conviene reforzar la imagen del subsuelo como un recurso seguro y útil para alcanzar la neutralidad climática, así como alejarse de imaginarios extractivistas o contaminantes que ya no reflejan la realidad de sus nuevas aplicaciones. Esta labor de sensibilización puede apoyarse en experiencias piloto de proximidad, como comunidades energéticas térmicas o proyectos de almacenamiento colectivo, que muestren de forma tangible los beneficios sociales, económicos, de generación de puestos de trabajo y ambientales que ofrecen estas soluciones.

cuatro

Listado de centros

CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Conexión Geociencias para un Planeta Sostenible	www.conexion-geociencias.csic.es	conexion-geociencias@csic.es
Geociencias Barcelona (GEO3BCN, CSIC)	www.geo3bcn.csic.es	direccion.geo3bcn@csic.es
Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT, CSIC)	www.iact.csic.es	direccion.iact@csic.es
Instituto de Carboquímica (ICB, CSIC)	www.icb.csic.es	direccion.icb@csic.es
Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR, CSIC)	www.incar.csic.es	contacto@incar.csic.es
Institut de Ciències del Mar (ICM, CSIC)	www.icm.csic.es	secredir@icm.csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)	www.idaea.csic.es	direccion.idaea@csic.es
Instituto de Geociencias (IGEO, UCM-CSIC)	www.igeo.ucm-csic.es	info@igeo.ucm-csic.es
Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC)	www.igme.es	igme@igme.es
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, UIB-CSIC)	www.imedeaiuib-csic.es	info@imedeaiuib-csic.es
Instituto de Tecnología Química (ITQ, UPV-CSIC)	www.itq.upv-csic.es	direccion.itq@csic.es

cinco

Para saber más



Agencia Estatal de Meteorología y Oficina Española de Cambio Climático (2018). *Cambio Climático: Calentamiento Global de 1,5 °C. Guía resumida Informe especial del IPCC sobre los impactos de un calentamiento global de 1,5 °C y las sendas de emisiones relacionadas*. Ministerio para la Transición Ecológica.



Consejo de la Unión Europea. (s. f.). Objetivo 55. ¿Qué es el paquete de medidas «Objetivo 55»? Recuperado 28 de noviembre de 2025.



EGDI / EuroGeoSurveys. (2025). *European Geological Data Infrastructure. A collaborative initiative aimed at facilitating the sharing, integration, and accessibility of geological information across Europe*.



Iberian Evaporite Structure Database.



Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020, octubre). *Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable*. MITECO.



Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Democrático. (2024, septiembre). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. Actualización 2023-2030*. MITECO.



Parlamento Europeo. (2024). P9_TA(2024)0049 Energía geotérmica. Resolución del Parlamento Europeo, de 18 de enero de 2024, sobre la energía geotérmica (2023/2111(INI)) (C/2024/5738). *Diario Oficial de la Unión Europea*, serie C. 17 de octubre de 2024.



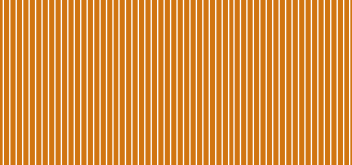
Plataforma Tecnológica Española del CO₂.



Riaño, V. V. (2025, 3 octubre). ¿Y si la clave para alcanzar las emisiones netas nulas estuviera bajo nuestros pies? *Muy Interesante*. <https://www.fundacionmuyinteresante.org/subsuelo-emisiones-netas-nulas.html>



What on Earth?! Geociencias para mentes curiosas. 2025.



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