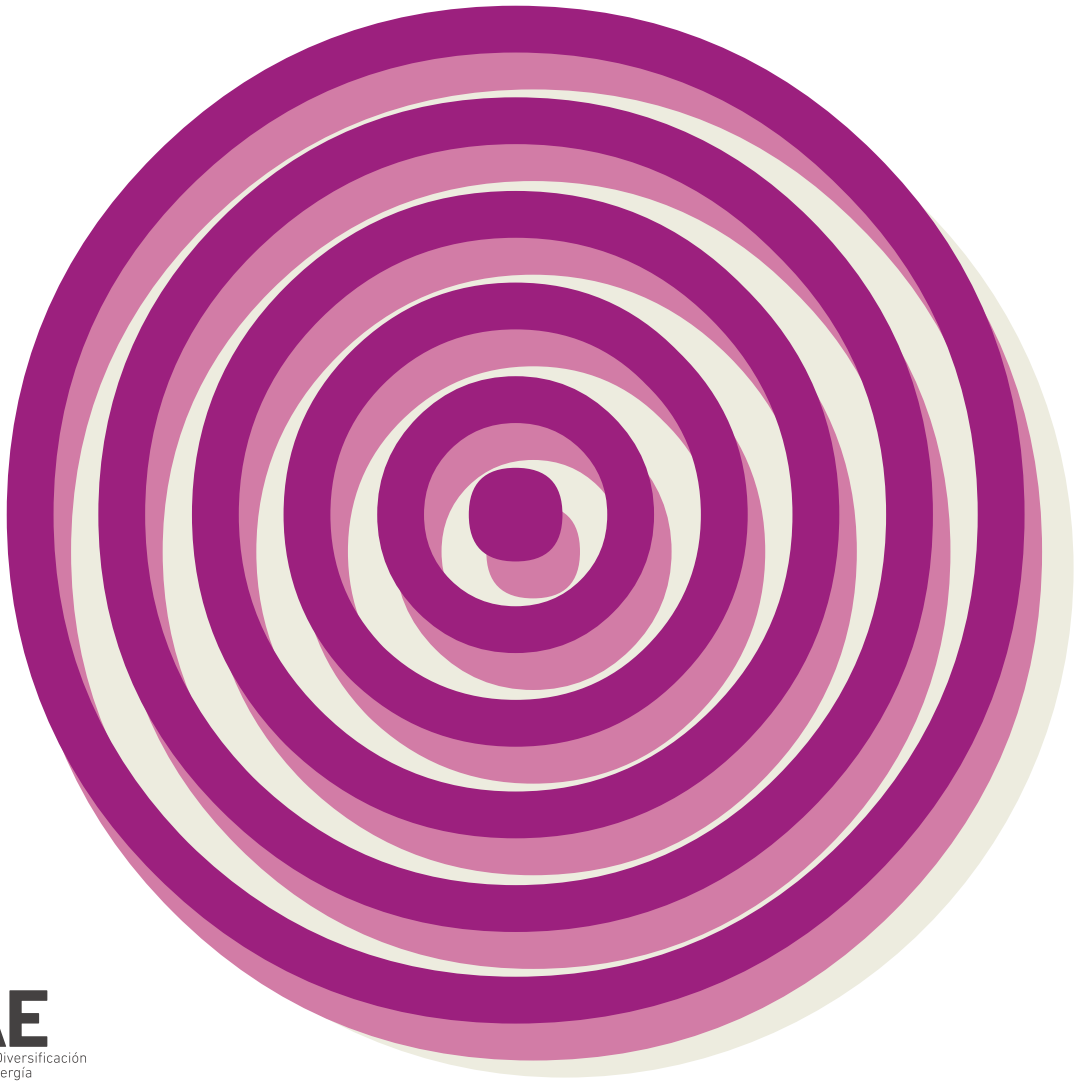
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

ESTUDIO TÉCNICO PER 2011-2020



IDAE
Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Coordinador de la edición de Estudios Técnicos PER 2011-2020:
Jaume Margarit i Roset, Director de Energías Renovables de IDAE

Título: Evaluación del potencial de energía geotérmica.
Estudio Técnico PER 2011-2020

Madrid, 2011

Autores:
TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A.: José Sanchez Guzmán, Laura Sanz López, Luis Ocaña Robles

Coordinación y revisión IDAE: Mª Carmen López Ocón, Carmen Mª Roa Tortosa

El presente estudio ha sido promovido por el IDAE en el marco de la elaboración del Plan de Energías Renovables (PER) en España 2011-2020. Aunque el IDAE ha supervisado la realización de los trabajos y ha aportado sus conocimientos y experiencia para su elaboración, los contenidos de esta publicación son responsabilidad de sus autores y no representan necesariamente la opinión del IDAE sobre los temas que se tratan en ella.

ÍNDICE

4 Presentación

6 Objetivos y trabajos realizados

8 Recopilación de información

10 Panorama actual de la utilización de la energía geotérmica en el mundo

38 Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos

65 Metodología de evaluación del potencial geotérmico

74 Los recursos geotérmicos en España. Definición y áreas de interés

170 Estimación de los recursos y reservas geotérmicos de España

192 Inventario de aprovechamientos geotérmicos de muy baja y baja temperatura en España

213 Conclusiones y propuestas de interés a efectos del PER 2011-2020

1 Presentación

El presente documento constituye la memoria correspondiente al Informe Final de los trabajos realizados en el estudio **EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ESPAÑA PARA LA ELABORACIÓN DEL PER 2011-2020** (REF.: P.C.P. 11227.19/09), adjudicado por el INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE) a TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A. (TRT), y llevado a cabo en el primer semestre de 2010.

El Informe se compone de la presente Memoria y un conjunto de Anexos, cuya estructura se ajusta al esquema planteado en el Pliego de Prescripciones Técnicas así como en la Oferta propuesta por TRT.

La memoria se ha organizado en capítulos correspondientes a los aspectos más importantes abordados, que en síntesis son los siguientes:

- **Objetivos**: resumen de los planteados por el IDAE y fijados como meta en el presente estudio.
- **Recopilación de información**: se trata de una labor esencial en el presente estudio, que ha sido necesario desarrollar prácticamente en todas y cada una de sus diferentes actividades a través de consultas de muy diversa índole, que son convenientemente expuestas lo largo del Informe.
- **Panorama actual de la energía geotérmica en el mundo**: se ha llevado a cabo un análisis de la utilización actual de la energía geotérmica a nivel mundial, con datos actualizados al año 2010 y pormenorizados por países.
- **Tecnologías de explotación de los recursos geotérmicos**: se trata de una amplia evaluación del estado de desarrollo actual de dichas tecnologías, en la que se abordan tanto las destinadas a la generación de energía eléctrica como al aprovechamiento directo del calor.
- **Metodología de evaluación de recursos y reservas**: se analizan en este apartado las diferentes metodologías de evaluación de recursos y reservas geotérmicos de uso más extendido, así como los conceptos y definiciones imprescindibles para su aplicación.
- **Los recursos geotérmicos en España. Definición y áreas de interés**: se realiza una pormenorizada revisión de los recursos geotérmicos existentes en España, clasificados en cinco diferentes tipos por el rango de temperatura. Se describen las características de cada uno de ellos y las áreas de existencia.
- **Estimación de recursos y reservas geotérmicos en España**: en este capítulo se lleva a cabo una evaluación detallada de los recursos y reservas presentes en diferentes áreas de la geografía española, siguiendo para ello la metodología previamente establecida y cuantificando para diferentes regiones geotérmicas tanto los recursos de base accesibles (RBA) como el calor almacenado (H_0) y su fracción recuperable (reservas).
- **Inventario de aprovechamientos geotérmicos de muy baja y baja temperatura en España**: se trata de uno de los aspectos del estudio donde la recopilación de información ha resultado más decisiva, en la medida en que ha requerido una consulta directa a las empresas del sector, así como el análisis exhaustivo de las publicaciones más recientes en la materia.
- **Conclusiones y propuestas de interés a efectos del PER 2011-2020:** el Informe concluye con una serie de recomendaciones que, a juicio de los autores, resultarían de interés de cara a definir el marco de desarrollo de la energía geotérmica en el nuevo PER 2011-2020.

2 Objetivos y trabajos realizados

De acuerdo con lo estipulado en el Pliego de Prescripciones Técnicas que ha regido el desarrollo del trabajo, el objetivo general perseguido ha sido: *"Realizar el estudio de evaluación del potencial de la energía geotérmica en España, con miras a establecer los objetivos para este área en el PER 2011-2020, que se integrará en un Sistema de Información Geográfica de Energías Renovables de IDAE".*

Para alcanzar dicho objetivo general ha sido necesario desarrollar un amplio conjunto de actividades, que representan, a su vez, objetivos parciales, cuya consecución resulta imprescindible para que el estudio en su conjunto alcance los fines previstos. En síntesis, se trata de los siguientes:

- Recopilación de información relativa a los siguientes aspectos relacionados con la energía geotérmica a nivel mundial: grado actual de aprovechamiento, tecnologías de explotación y metodologías de evaluación.
- Recopilación de información relativa a los siguientes aspectos relacionados con la energía geotérmica a nivel nacional: estudios y proyectos desarrollados desde los años setenta hasta la actualidad; inventario de aprovechamientos actuales; mercado potencial de la energía geotérmica en España; marco jurídico de referencia, etc.
- Síntesis del panorama actual de la energía geotérmica a nivel mundial en sus diferentes modalidades de aprovechamiento, así como de las tecnologías de explotación actualmente aplicadas y en fase de desarrollo.
- Descripción de las metodologías en uso de evaluación de recursos y reservas.
- Definición y caracterización de áreas de interés geotérmico en España.
- Selección de una metodología eficaz y contrastada de evaluación del potencial geotérmico y aplicación de la misma al cálculo de recursos y reservas en España.
- Selección de los aspectos más relevantes del estudio, tanto de carácter informativo como interpretativo, que habrán de incorporarse al Sistema de Información Geográfica de Energías Renovables del IDAE.
- Planteamiento de las cuestiones esenciales que habrán de ser consideradas a la hora de establecer objetivos para la energía geotérmica en el marco del nuevo PER 2011-2020.

3 Recopilación de información

En el marco de las actividades previstas en el Proyecto se ha llevado a cabo una amplia y variada labor de recopilación de información, que concierne básicamente a las siguientes áreas de trabajo:

a) **Panorama actual de la utilización de la energía geotérmica en el mundo**. Con el fin de disponer de la información más actualizada, completa y fiable acerca del grado actual de aprovechamiento de la energía geotérmica en todos los países que emplean actualmente este recurso, la recopilación de datos se centró en las ponencias presentadas en el *World Geothermal Congress 2010*, celebrado en Bali en abril del presente año.

b) **Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos**. Comprende un análisis tanto de las tecnologías empleadas actualmente para la generación de energía eléctrica y para usos directos de calor, como de aquéllas que, si bien se encuentran aún en fase experimental, se prevé que a corto o medio plazo resulten competitivas a nivel técnico y comercial. La documentación empleada proviene principalmente de fuentes que son referencia en el ámbito geotérmico a nivel internacional, especialmente en lo referente a tecnologías en desarrollo.

c) **Metodologías de evaluación de recursos y reservas geotérmicos**. La información recopilada comprende las metodologías de uso más extendido, propuestas por autores de contrastado prestigio en cada una de ellas, si bien el interés se ha centrado principalmente en el método volumétrico o *heat in place* aplicado en el marco del presente Proyecto.

d) **Documentos de referencia elaborados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en el ámbito de la energía geotérmica**. Es de sobra conocido que el IGME constituye el organismo de referencia en cuanto concierne a la investigación geotérmica en España, por lo que sus fondos documentales constituyen la mejor y más completa fuente de información que puede encontrarse en este ámbito a nivel nacional. Por este motivo, se consideró de interés prioritario realizar un análisis exhaustivo de dichos fondos documentales. En el Anexo 4 de este informe se presenta un listado completo de referencias bibliográficas.

e) **Inventario de aprovechamientos de energía geotérmica de muy baja temperatura en España**. El objetivo es disponer de una estimación, lo más ajustada a la realidad que la información disponible lo permita, del grado de aprovechamiento actual de los recursos geotérmicos de muy baja temperatura en España. Ante la ausencia de inventarios nacionales o autonómicos de este tipo, se optó por realizar una consulta a las empresas del sector mediante el envío de cuestionarios, labor que se complementó con una recopilación de diversos documentos de reciente publicación, en los que se describe de forma monográfica algunos de los aprovechamientos geotérmicos realizados en España en los últimos años.

4 Panorama actual de la utilización de la energía geotérmica en el mundo

El World Geothermal Congress 2010 celebrado en Bali en abril del presente año incluyó, al igual que en ediciones anteriores, sendas ponencias en las que se pone al día la información relativa al grado de utilización de la energía geotérmica en usos directos[1] y para generación de energía eléctrica[2] a nivel mundial. Ambos artículos constituyen la referencia más actualizada, completa y fiable sobre estos aspectos, por lo que se ha optado por emplearlos como fuente principal de información para definir el panorama actual de esta energía.

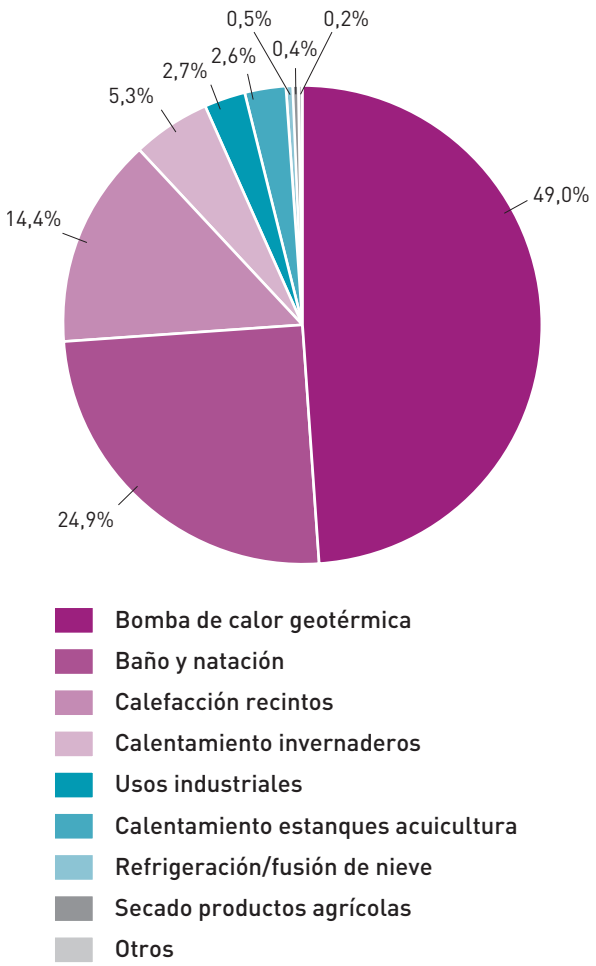
4.1 USOS DIRECTOS

4.1.1 Datos a escala mundial

La utilización directa como fuente de calor de la energía geotérmica constituye la forma más antigua, versátil y también la más común de aprovechamiento de esta forma renovable de energía. Los datos disponibles indican que, a finales del año 2009, el número de países que hacían uso de la misma con el fin citado era de **78**, con una capacidad instalada de **50.583 MWt**. Esta última cifra representa un crecimiento del **78,9%** respecto a los datos de 2005, lo que significa un incremento anual medio del **12,33%**, con un factor de capacidad de **0,27** (equivalente a 2.365 horas de operación a plena carga al año).

La energía térmica utilizada fue de **121.696 GWh/año** (438.071 TJ/año), lo que significa un **60,2%** más que en 2005 (9,9% de incremento anual). Ello supuso un ahorro energético por año estimado de **307,8 millones de barriles de petróleo** (46,2 millones de toneladas), así como un ahorro de emisiones de **148,2 millones de toneladas de CO_2** (comparado con el empleo de petróleo para generar electricidad). La bomba de calor geotérmica representó el **49%** de los usos térmicos de esta energía, mientras que el **24,9%** se destinó a usos balnearios y de calentamiento de piscinas y un **14,4%** a la calefacción de recintos. La Figura 4.1 refleja con mayor detalle esta distribución por usos térmicos.

Figura 4.1. Energía geotérmica utilizada en usos directos en el mundo (año 2010)



Según se ha indicado, tanto la capacidad instalada como la energía térmica utilizada destinadas a usos directos se encuentran en franco crecimiento en el conjunto de los 78 países que emplean energía geotérmica. Según refleja la Figura 4.2, en los últimos 15 años ambos parámetros han experimentado fuertes incrementos de forma ininterrumpida, al punto de que, respecto a 1995, la capacidad instalada en 2010 se ha multiplicado por 5,8, y casi por 4 la energía utilizada. La distribución por usos de dicha capacidad se refleja en la Figura 4.3.

[1]Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.H. ***Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review*** Proceedings World Geothermal Congress 2010 (Bali, Indonesia)

[2]Bertani, R. ***Geothermal Power Generation in the World. 2005-2010 Update Report*** Proceedings World Geothermal Congress 2010 (Bali, Indonesia)

Figura 4.2. Evolución de la capacidad instalada y la energía térmica utilizada durante el período 1995-2005

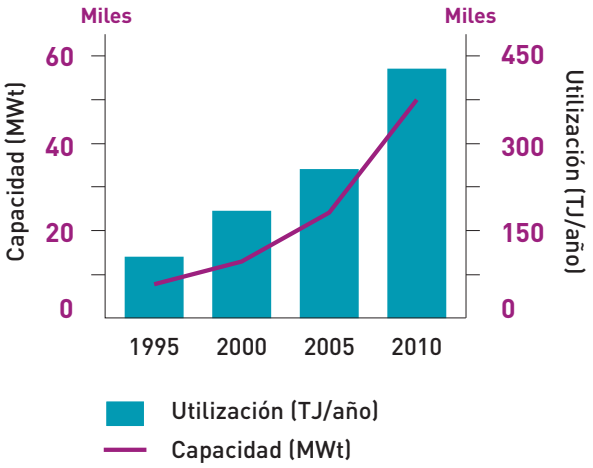
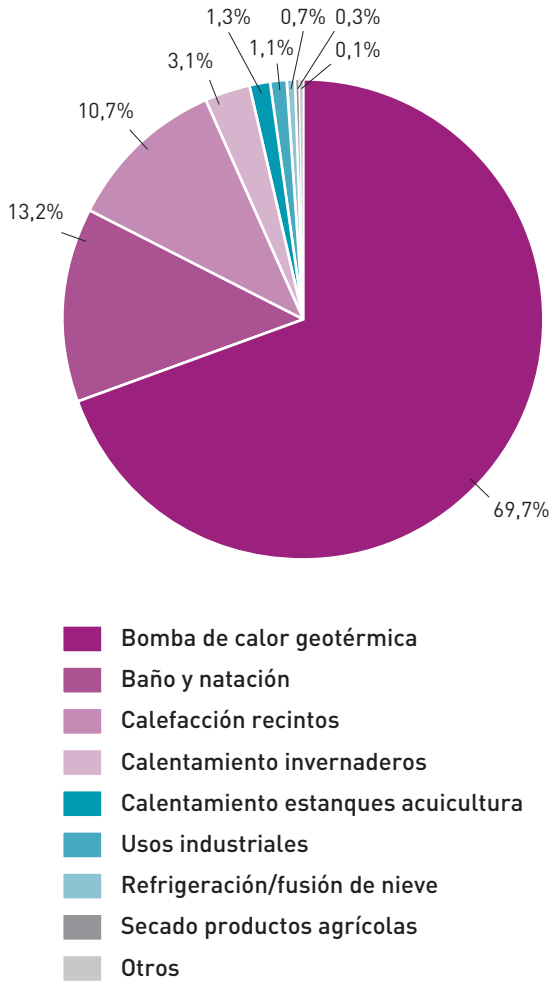
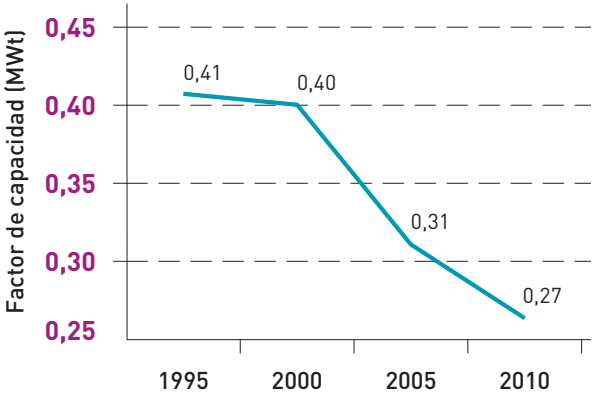


Figura 4.3. Capacidad instalada para usos directos (año 2010)



La disminución en el mismo período del factor de capacidad (ver Figura 4.4) y el crecimiento de la energía utilizada, son consecuencia del incremento del número de instalaciones que emplean la bomba de calor geotérmica. Sólo en los últimos cinco años, la energía utilizada por estos dispositivos creció 2,45 veces, a un ritmo anual del 19,7%, mientras que la potencia instalada lo hizo en cifras parecidas: 2,25 veces y un 18% de crecimiento anual. El factor medio de capacidad en el caso concreto de la bomba de calor geotérmica en el conjunto de países considerados fue, en el año 2010, de **0,19**.

Figura 4.4. Evolución del factor de capacidad durante el período 1995-2010



En lo referente a los diferentes usos de la energía, la tabla 4.1. ofrece un resumen, para cada uno de ellos, de los valores de la capacidad instalada, energía térmica utilizada y factores de capacidad correspondientes a los últimos 15 años. Estos resultados se presentan también de forma gráfica en la Figura 4.5. En el caso de la calefacción de recintos, a falta de datos más precisos los autores estiman que los sistemas de calefacción centralizada *(district heating)* concentran del orden del 85% de la capacidad instalada y del 84% de la energía utilizada en este tipo de aprovechamiento.

Es importante destacar que la generalización del uso de la bomba de calor geotérmica ha abierto la posibilidad de que esta energía pueda aprovecharse casi en cualquier lugar, tanto para calefacción como para refrigeración. De igual modo, su uso está siendo fomentado por la utilización de recursos de baja y media temperatura en centrales de generación combinada de electricidad y calor, donde aguas de temperatura inferior a 100 ºC se hacen circular primero, a través de un ciclo binario (Rankine) para producir electricidad y, posteriormente, son empleadas como fuente de calor para diferentes aplicaciones (calefacción, piscinas, invernaderos,

acuicultura, etc.) antes de ser reinyectadas en el acuífero. Este tipo de instalaciones, frecuentes en países del norte de Europa como Islandia, Alemania o Austria, obviamente maximizan el aprovechamiento del recurso geotérmico así como su rendimiento económico.

4.1.2 Distribución por países

La tabla 4.2 refleja la relación alfabética de los 78 países para los que se dispone de información acerca de usos directos de la energía geotérmica, así como los valores para el año 2010 de los tres parámetros anteriormente mencionados.

Los cinco países que cuentan con la mayor capacidad instalada son **Estados Unidos, China, Suecia, Noruega y Alemania** que, en conjunto, representan el **62,8%** de la capacidad mundial.

Tabla 4.1. Evolución de la capacidad instalada (a), energía térmica utilizada (b) y factor de capacidad (c) durante el período 1995-2010
(a)

Usos	Capacidad instalada (MWt)			
	1995	2000	2005	2010
Bomba de calor geotérmica	1.854	5.275	15.384	35.236
Calefacción de recintos	2.579	3.263	4.366	5.391
Calentamiento invernaderos	1.085	1.246	1.404	1.544
Calentamiento estanques acuicultura	1.097	605	616	653
Secado productos agrícolas	67	74	157	127
Usos industriales	544	474	484	533
Baño y natación	1.085	3.957	5.401	6.689
Refrigeración/fusión de nieve	115	114	371	368
Otros	238	137	86	41
Total	**8.664**	**15.145**	**28.269**	**50.583**

(Continuación)

(b)

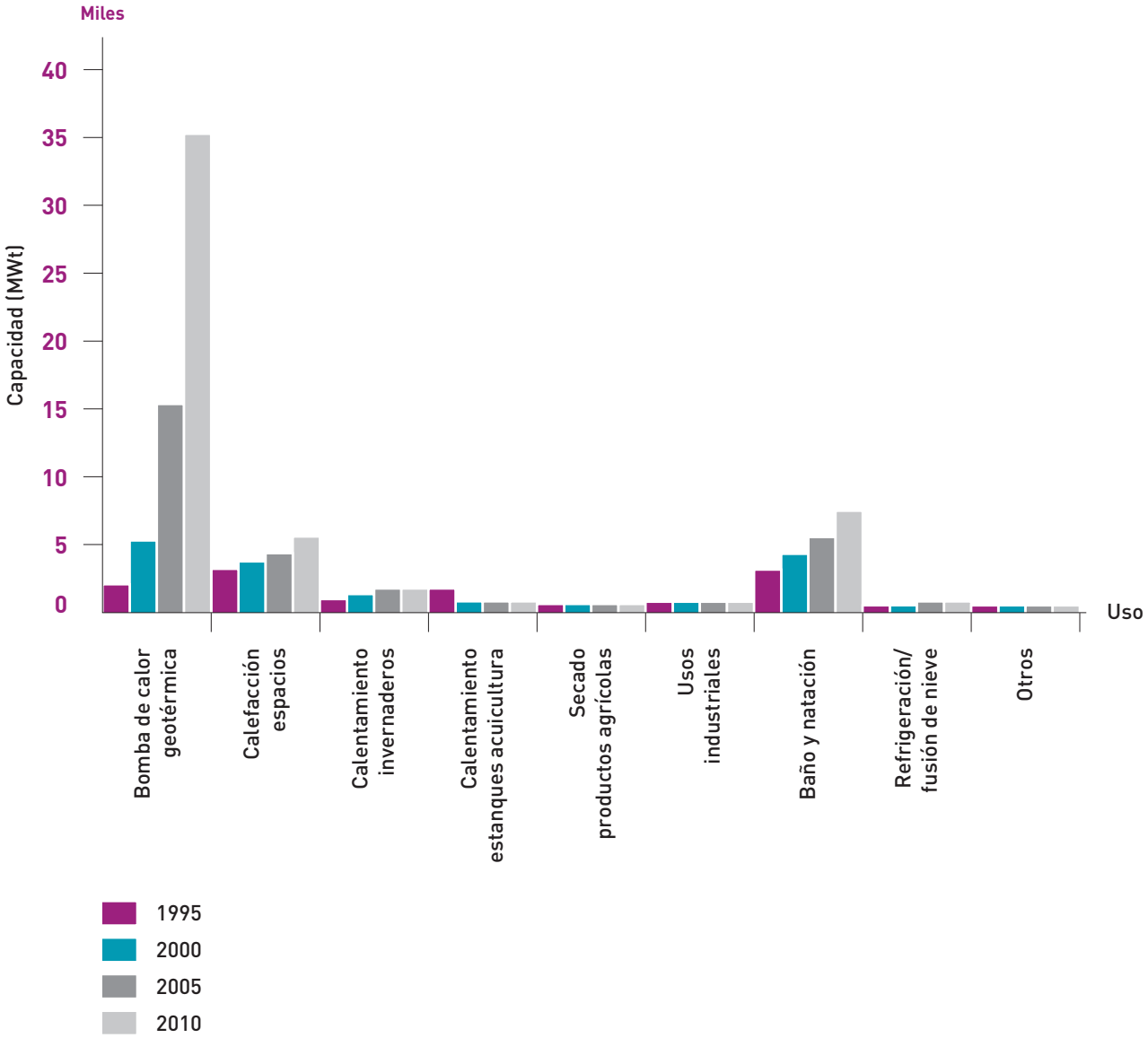
Usos	Utilización (TJ/año)			
	1995	2000	2005	2010
Bomba de calor geotérmica	14.617	23.275	87.503	214.782
Calefacción de recintos	3.823	42.926	55.256	62.984
Calentamiento invernaderos	15.742	17.864	20.661	23.264
Calentamiento estanques acuicultura	13.493	11.733	10.976	11.521
Secado productos agrícolas	1.124	1.038	2.013	1.662
Usos industriales	1.012	1.022	10.868	11.746
Baño y natación	15.742	79.546	83.018	109.032
Refrigeración/fusión de nieve	1.124	1.063	2.032	2.126
Otros	2.249	3.034	1.045	956
Total	**112.441**	**190.699**	**273.372**	**438.071**

(c)

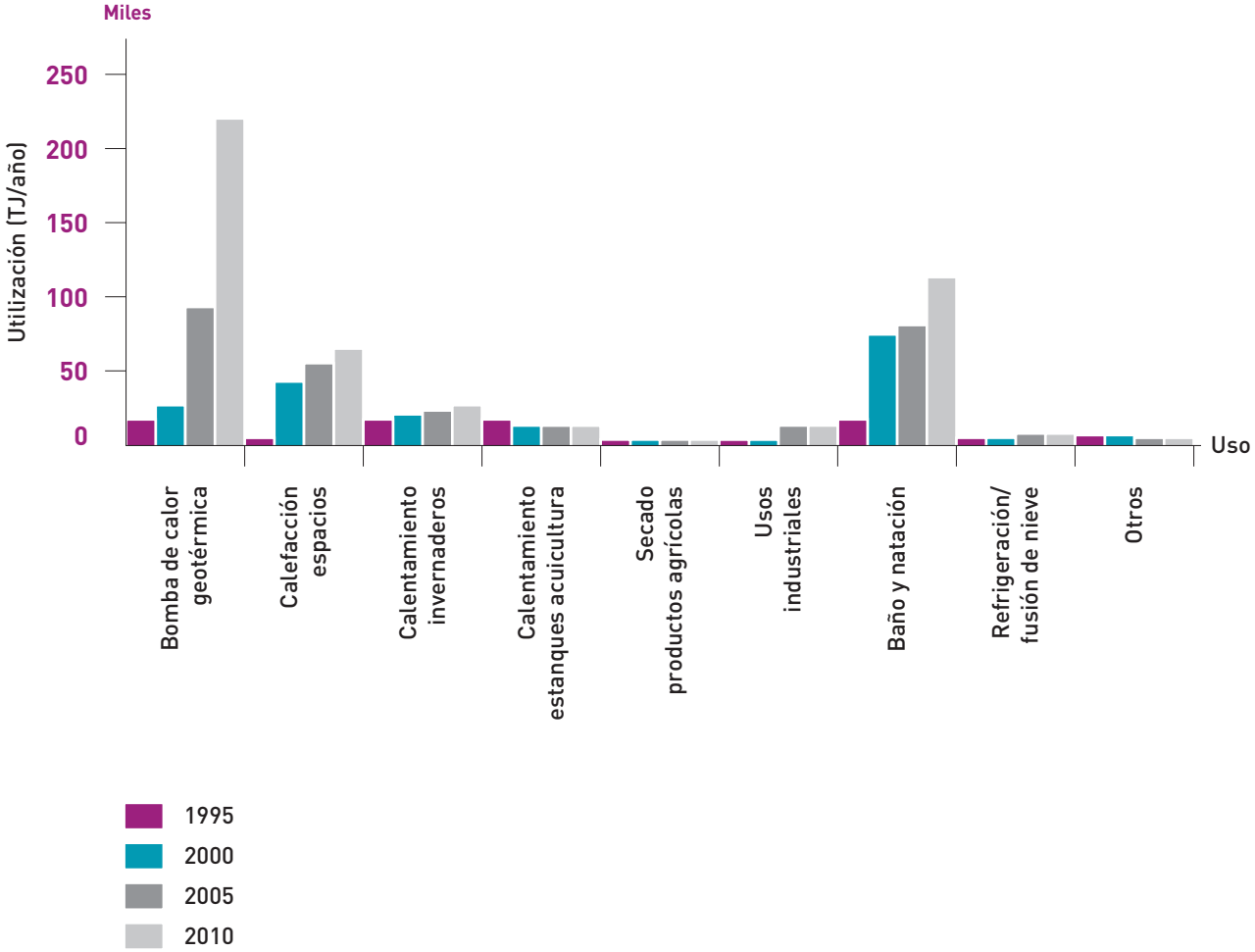
Usos	Factor de capacidad			
	1995	2000	2005	2010
Bomba de calor geotérmica	0,25	0,14	0,18	0,19
Calefacción de recintos	0,47	0,42	0,4	0,37
Calentamiento invernaderos	0,46	0,45	0,47	0,48
Calentamiento estanques acuicultura	0,39	0,61	0,57	0,56
Secado productos agrícolas	0,53	0,44	0,41	0,42
Usos industriales	0,59	0,68	0,71	0,7
Baño y natación	0,46	0,64	0,49	0,52
Refrigeración/fusión de nieve	0,31	0,3	0,18	0,18
Otros	0,3	0,7	0,39	0,73
Total	**0,41**	**0,4**	**0,31**	**0,27**

Figura 4.5. Evolución de la capacidad instalada (a), energía térmica utilizada (b) y factor de capacidad (c) durante el período 1995-2010

(a)



(b)


Miles
250
200
150
100
50
0
Utilización (TJ/año)
Uso
Bomba de calor geotérmica
Calefacción espacios
Calentamiento invernaderos
Calentamiento estanques acuicultura
Secado productos agrícolas
Usos industriales
Baño y natación
Refrigeración/ fusión de nieve
Otros
1995
2000
2005
2010

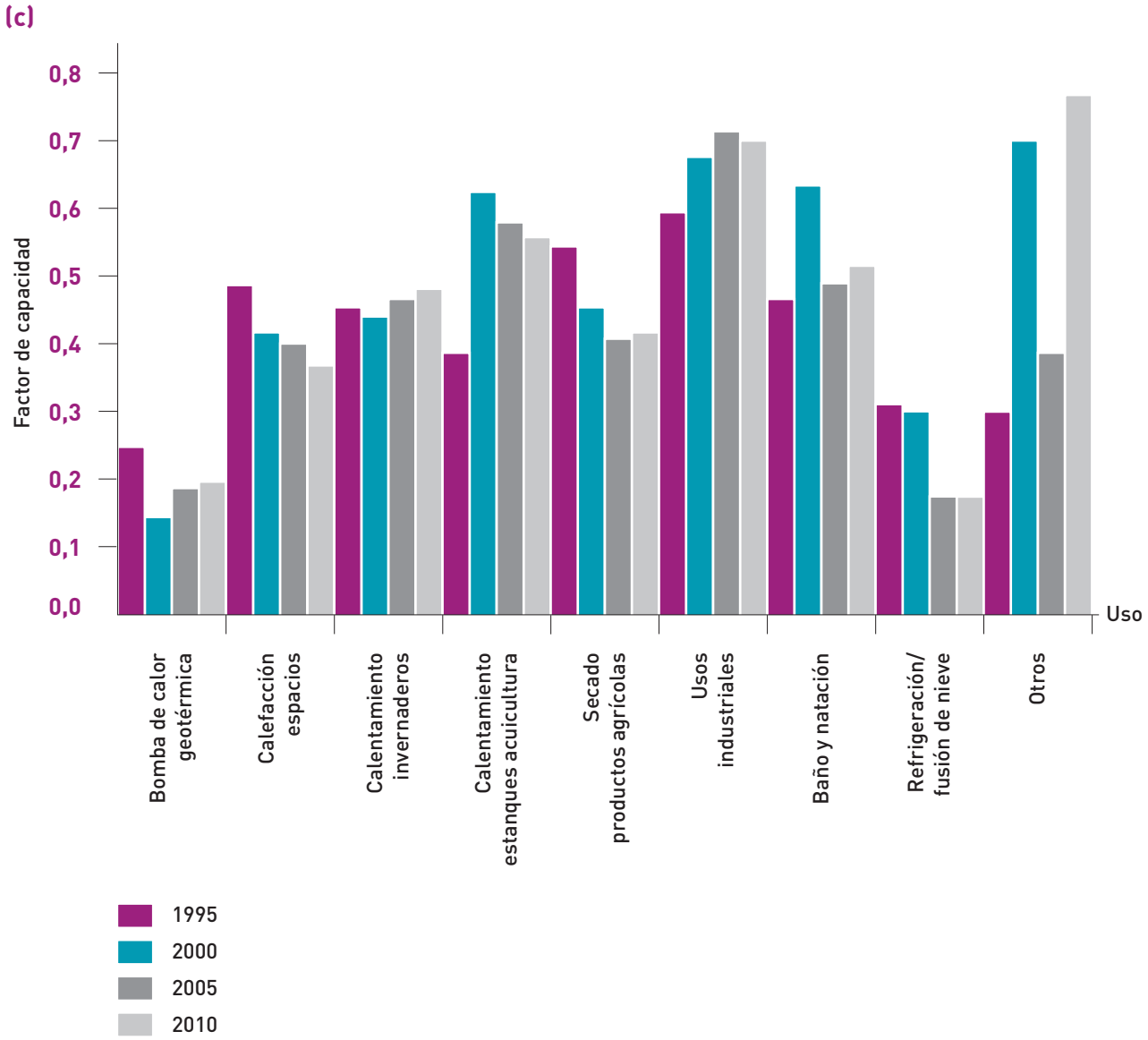


Tabla 4.2. Distribución de la capacidad instalada, energía térmica utilizada y factor de capacidad (año 2010)

País	Capacidad instalada (MWt)	Utilización anual		Factor de capacidad
		TJ/año	GWh/año	
Albania	11,5	40,5	11,2	0,10
Alemania	2.485,4	12.764,5	3.546,0	0,16
Argelia	55,6	1.723,1	478,7	1,00
Argentina	307,5	3.906,7	1.085,3	0,40

(Continuación)

País	Capacidad instalada (MWt)	Utilización anual		Factor de capacidad
		TJ/año	GWh/año	
Armenia	1,0	15,0	4,2	0,50
Australia	33,3	235,1	65,3	0,20
Austria	662,9	3.727,7	1.035,6	0,20
Bélgica	117,9	547,0	151,9	0,20
Bielorrusia	3,4	33,8	9,4	0,30
Bosnia & Herzegovina	21.696,0	255,36	70,9	0,30
Brasil	360,1	6.622,4	1.839,7	0,60
Bulgaria	98,3	1.370,1	380,6	0,40
Canadá	1.126,0	8.873,0	2.464,9	0,25
Chile	9,1	131,8	36,6	0,46
China	8.898,0	75.348,3	20.931,8	0,27
Colombia	14,4	287,0	79,7	0,63
Corea del Sur	229,3	1.954,7	543,0	0,27
Costa Rica	1,0	21,0	5,8	0,67
Croacia	67,5	468,9	130,3	0,22
Dinamarca	200,0	2.500,0	694,5	0,40
Ecuador	5,2	102,4	28,4	0,63
Egipto	1,0	15,0	4,2	0,48
El Salvador	2,0	40,0	11,1	0,63
Eslovaquia	132,2	3.067,2	852,1	0,74
Eslovenia	104,2	1.136,4	315,7	0,35
España	141,0	684,1	190,0	0,15
Estados Unidos	12.611,5	56.551,8	15.710,1	0,14

(Continuación)

País	Capacidad instalada (MWt)	Utilización anual		Factor de capacidad
		TJ/año	GWh/año	
Estonia	63,0	356,0	98,9	0,18
Etiopía	2,2	41,6	11,6	0,60
Filipinas	3,3	39,6	11,0	0,38
Finlandia	857,9	8.370,0	2.325,2	0,31
Francia	1.345,0	12.929,0	3.591,7	0,30
Georgia	24,5	659,2	183,1	0,85
Grecia	134,6	937,8	260,5	0,22
Guatemala	2,3	56,5	15,7	0,78
Holanda	1.410,3	10.699,4	2.972,3	0,24
Honduras	1,9	45,0	12,5	0,74
Hungría	654,6	9.767,0	2.713,3	0,47
India	265,0	2.545,0	707,0	0,30
Indonesia	2,3	42,6	11,8	0,59
Irán	41,6	1.064,2	295,6	0,81
Irlanda	152,9	764,0	212,2	0,16
Islandia	1.826,0	24.361,0	6.767,5	0,42
Islas del Caribe	0,1	2,8	0,8	0,85
Israel	82,4	2.193,0	609,2	0,84
Italia	867,0	9.941,0	2.761,6	0,36
Japón	2.099,5	25.697,9	7.138,9	0,39
Jordania	153,3	1.540,0	427,8	0,32
Kenia	16,0	126,6	35,2	0,25
Letonia	1,6	31,8	8,8	0,62

(Continuación)

País	Capacidad instalada (MWt)	Utilización anual		Factor de capacidad
		TJ/año	GWh/año	
Lituania	48,1	411,5	114,3	0,27
Macedonia	47,2	601,4	167,1	0,40
Marruecos	5,0	79,1	22,0	0,50
México	155,8	4.022,8	1.117,5	0,82
Mongolia	6,8	213,2	59,2	0,99
Nepal	2,7	73,7	20,5	0,86
Noruega	3.300,0	25.200,0	7.000,6	0,24
Nueva Zelanda	393,2	9.552,0	2.653,5	0,77
Papúa Nueva Guinea	0,1	1,0	0,3	0,32
Perú	2,4	49,0	13,6	0,65
Polonia	281,1	1.501,1	417,0	0,17
Portugal	28,1	386,4	107,3	0,44
Reino Unido	186,6	849,7	236,1	0,14
República Checa	151,5	922,0	256,1	0,19
Rumanía	153,2	1.265,4	351,5	0,26
Rusia	308,2	6.143,5	1.706,7	0,63
Serbia	100,8	141,0	39,17	0,44
Suecia	4.460,0	45.301,0	12.584,6	0,32
Suiza	1.060,9	7.714,6	2.143,1	0,23
Sudáfrica	6,0	114,8	31,9	0,61
Tailandia	2,5	79,1	22,0	0,99
Tajikistán	2,9	55,4	15,4	0,60
Túnez	43,8	364,0	101,1	0,26

(Continuación)

País	Capacidad instalada (MWt)	Utilización anual		Factor de capacidad
		TJ/año	GWh/año	
Turquía	2.084,0	36.885,9	10.246,9	0,56
Ucrania	10,9	118,8	33,0	0,35
Venezuela	0,7	14,0	3,9	0,63
Vietnam	31,2	92,3	25,6	0,09
Yemen	1,0	15,0	4,2	0,48
Total	**50.583,0**	**438.071,0**	**121.696,0**	**0,27**

En lo que respecta a la energía utilizada, las cinco primeras posiciones están ocupadas por **China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Japón,** en este caso con un **54,7%** del total mundial. España ocupa el puesto número 31 en capacidad instalada (141 MWt) y el 38 en energía utilizada (684 TJ/año). No obstante, si se consideran la población y la superficie, son los países pequeños –especialmente los del norte de Europa– los que se sitúan a la cabeza. En el primer caso (MWt/población) los cinco primeros puestos corresponden a Islandia, Suecia, Noruega, Nueva Zelanda y Suiza mientras que, en términos de energía utilizada (TJ/año.superficie), serían Holanda, Suiza, Islandia, Noruega y Suecia.

Los mayores incrementos de capacidad instalada (MWt) de los últimos cinco años se registran en el Reino Unido, Corea, Irlanda, **España** y Holanda mientras que, en el caso de la energía utilizada (TJ/año), las cinco primeras posiciones corresponden al Reino Unido, Holanda, Corea, Noruega e Irlanda. Ambos incrementos son consecuencia del empleo de bombas de calor geotérmicas.

4.1.3 Distribución por categorías de uso

a) Bomba de calor geotérmica. Este tipo de dispositivo representa el 69,7% (35.236 MWt) y el 49,0% (214.782 TJ/año), respectivamente, de la capacidad instalada y de la energía utilizada a nivel mundial, con un factor de capacidad medio de 0,19 (modo calor). El número de unidades equivalentes de 12 kW –valor típico para viviendas en Europa occidental y Estados Unidos– instaladas en 2010 es, aproximadamente, de 2,94 millones, más del doble de las de 2005 y cuatro veces las del año 2000. La capacidad individual de estas bombas oscila entre los 5,5 kW de las destinadas a usos residenciales, y las de más de 150 kW empleadas en instalaciones comerciales e institucionales. Los países líderes en unidades instaladas son Estados Unidos, China, Suecia, Noruega y Alemania.

En Estados Unidos, la mayor parte de estos dispositivos están dimensionados para cubrir cargas pico de refrigeración, y se encuentran sobredimensionados para calefacción salvo en los estados del norte, por lo que el valor medio estimado de horas de operación al año es de sólo 2.000 (factor de capacidad = 0,23). Por el contrario, en Europa la mayoría de las bombas de calor geotérmicas están dimensionadas para proporcionar la carga base de calefacción, mientras que los picos se cubren con combustibles fósiles. De ahí que sus horas/año de operación superen con frecuencia las 6.000 a plena carga (factor de capacidad de 0,68), tal como ocurre en los países nórdicos. No obstante, salvo que se conozca el valor exacto, el dato que suele emplearse como referencia para calcular la energía utilizada es de 2.200 horas, salvo en el ya mencionado caso de los países nórdicos.

b) Calefacción de recintos. La capacidad instalada y la energía utilizada para este tipo de aplicación en 2010 asciende, respectivamente, a 5.391 MWt y 62.984 TJ/año, cifras que representan sendos

incrementos del 24% y del 14% respecto al año 2005. Según se indicó anteriormente, el 85% de la capacidad instalada y el 84% de la energía utilizada corresponden a sistemas de calefacción centralizada (*district heating*). Los países líderes en la utilización de estos últimos son Islandia, China, Turquía, Francia y Rusia, mientras que entre los mayores usuarios de los sistemas individuales figuran Turquía, Italia, Estados Unidos, Japón y Georgia.

c) **Calefacción de invernaderos**. La capacidad instalada y la energía utilizada para estas aplicaciones alcanza en el año 2010 un total de 1.544 MWt de capacidad y 23.264 TJ/año respectivamente, lo que supone sendos incrementos del 10% y del 13% respecto a 2005. Las posiciones de cabeza entre los 37 países que emplean energía geotérmica para este fin corresponden a Turquía, Hungría, Rusia, China e Italia. Verduras y flores son los cultivos más frecuentes en estas instalaciones. La cifra de energía utilizada antes mencionada corresponde aproximadamente a 1.163 hectáreas de invernaderos calentadas al año (unos 20 TJ/año por hectárea).

d) **Aplicaciones en acuicultura**. La capacidad instalada para este tipo de aplicaciones (653 MWt) se incrementó respecto a 2005 un 6%, y un 5% en lo referente a la energía utilizada (11.521 TJ/año). Ello ha supuesto una inversión de la tendencia decreciente que venía manifestándose desde el año 1995. El número de países que emplean esta tecnología asciende a 22, entre los que destacan China, Estados Unidos, Italia, Islandia e Israel. Tomando como referencia una cifra estimada para Estados Unidos de 0,242 TJ/año por tonelada de pescado, la producción asociada al consumo de energía geotérmica en 2010 habría ascendido a unas 47.600 t de este producto.

e) **Aplicaciones de secado de productos agrícolas**. El número de países en los que existe constancia del empleo de energía geotérmica para el secado de diversos tipos de grano, verduras, frutas etc., es de sólo 14 en el año 2010, con una capacidad instalada de 127 MWt y una energía utilizada de 1.662 TJ/año.

f) **Aplicaciones asociadas a procesos industriales**. Si bien el número de países que emplean esta fuente de energía para usos industriales está descendiendo, las operaciones realizadas tienden a incrementar su magnitud y a elevarse los consumos energéticos. Entre sus aplicaciones destacan el curado de hormigón, embotellado de agua y bebidas carbonatadas, pasteurizado de leche, industria del cuero, extracción química, procesado de pulpa y papel, etc. La capacidad instalada y la energía utilizada ascienden actualmente a 533 MWt y 11.746 TJ/año respectivamente. Este tipo de aprovechamiento posee el factor de capacidad más elevado entre los usos directos (0,70), debido a que se trata de procesos industriales que operan durante gran parte del año.

g) **Fundido de nieve y refrigeración de recintos**. Se trata de aplicaciones muy limitadas. La primera de ellas se reduce a una serie de proyectos en Argentina, Islandia, Japón, Suiza y Estados Unidos, con un total de 2 millones de metros cuadrados de pavimento calentado con esta energía, la mayor parte en Islandia, con requerimientos que oscilan entre 130 y 180 W/m^2. La capacidad instalada es de 311 MWt y la energía utilizada de 1.845 TJ/año, valores que, en el caso de las aplicaciones para refrigeración, se reducen a 56 MWt y 281 TJ/año.

h) **Aplicaciones en balnearios y piscinas**. Básicamente se refieren al empleo de energía geotérmica para el calentamiento de piscinas y en usos relacionados con la industria balnearia (spas, resorts, balneoterapia...). En estos últimos es frecuente que el agua termal fluya de forma continua. Pese a lo extendido de su uso –actualmente son 67 los países que informan de su empleo, y algunos más los que lo hacen aunque sin aportar datos concretos–, no siempre es posible cuantificarlos, si bien pueden emplearse como cifras características de una instalación tipo las siguientes: 0,35 MWt y 7,0 TJ/año. A escala mundial, la capacidad instalada alcanza en 2010 un valor de 6.689 MWt, con una energía utilizada de 109.032 TJ/año, lo que representa un 24% y un 31% más, respectivamente, que las cifras del año 2005. Las más elevadas corresponden a China, Japón, Turquía, Brasil y México.

i) **Otros usos**. Comprenden aplicaciones en granjas de animales, cultivo del alga *espirulina*, esterilización de recipientes y desalinización. La capacidad instalada y la energía utilizada en los siete países que aportan información al respecto ascienden, respectivamente, a 41 MWt y 956 TJ/año.

4.1.4 Factor de capacidad

Las tablas 4.1 y 4.2 antes citadas reflejan, respectivamente, los valores de los factores de capacidad clasificados por usos y por países. Este parámetro refleja el porcentaje equivalente de horas de funcionamiento anual a plena carga de un determinado tipo de instalación (por ejemplo, un factor de capacidad de 0,70 significa un 70% de horas/año de funcionamiento a plena carga, es decir, 6.132 horas/año equivalentes). Se calcula mediante la expresión:

Factor de capacidad = (energía anual utilizada en TJ/año)/(capacidad instalada en MWt) x 0,1317

Sus valores oscilan entre 0,09 y 0,99 en el caso de los países, y entre 0,18 y 0,70 cuando se consideran categorías de uso. Los más bajos pertenecen a los países que emplean con más intensidad la bomba de calor geotérmica, mientras que los más elevados se asocian a aquéllos en los que predominan las aplicaciones industriales y para piscinas y aguas de baño.

El valor medio a escala mundial del factor de capacidad descendió de 0,40 en el año 2000, a 0,31 en 2005 y a 0,27 en 2010. Tal variación es consecuencia del incremento en la utilización de la bomba de calor geotérmica. Por el contrario, los valores por categorías de uso apenas difieren de los registrados en 2005.

4.1.5 Ahorro energético

La energía geotérmica es una fuente de energía sostenible y renovable, capaz de reemplazar a otras fuentes energéticas entre las que, naturalmente, se incluyen a los combustibles fósiles, con lo que ello significa en términos de reducción, tanto de la dependencia energética como de las emisiones de gases de efecto invernadero y partículas.

El artículo de J. W. Lund citado al comienzo de este capítulo, incluye una estimación de la reducción del consumo de combustibles fósiles y de ahorro de emisiones asociados al empleo de la energía geotérmica, basado en la utilización de un factor de eficiencia de 0,35 si la misma energía se hubiera empleado para generar electricidad, y de 0,70 si el aprovechamiento lo fuese en forma de calor (por ejemplo, en un horno).

Considerando el valor de 438.071 TJ/año de consumo energético en usos directos recogido en la tabla 1b, y un contenido energético para el barril de petróleo de 6,06 x 10^9 J, en el caso de la generación eléctrica el ahorro ascendería a **206,5** millones de barriles (**31** millones de toneladas de crudo al año, equivalente a tres días de consumo mundial), mientras que si se hubiese empleado en usos directos la cifra sería prácticamente la mitad: **103,2** millones de barriles (**15,5** millones de toneladas de crudo). La información disponible apunta a que el dato real probablemente se encuentre entre uno y otro valor.

Por último, en lo referente al ahorro de emisiones, la tabla 4.3 refleja los valores estimados por Lund considerando que la misma cantidad de energía geotérmica consumida en usos directos, hubiese sido utilizada en generar electricidad a partir de tres tipos de combustibles: gas natural, petróleo y carbón. En el caso de emplearse para producir calor, las emisiones serían, aproximadamente, la mitad de las reflejadas en dicha tabla.

Tabla 4.3. Emisiones asociadas a la generación de electricidad mediante una cantidad de energía similar a la de origen geotérmico consumida en usos directos durante el año 2010, empleando diferentes tipos de combustibles

Combustible	Ahorro de emisiones (millones de toneladas)			
	CO_2	SO_x	NO_x	Total
Gas natural	23,48	0,0	0,05	23,53
Petróleo	99,44	0,66	0,19	100,29
Carbón	115,96	0,61	0,19	0,8
Total	**122,92**	**1,27**	**0,43**	**124,62**

4.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

42.1 Datos a escala mundial

Según refleja el artículo de R. Bertani citado al comienzo de este capítulo, la capacidad instalada de las plantas de producción de electricidad a partir de energía geotérmica alcanzó en el año 2010 la

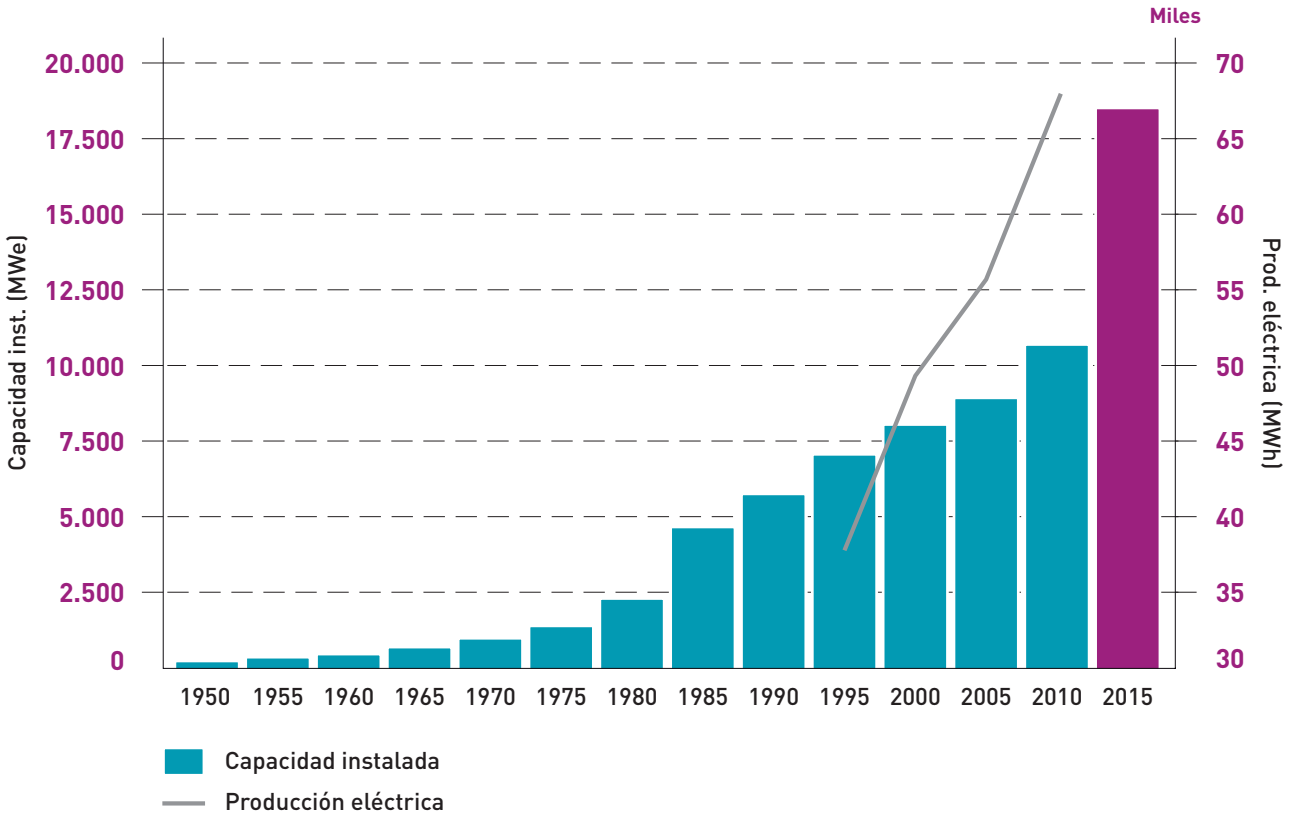
cifra de **10.715 MWe**, lo que significa un aumento del **19,9%** (1.782 MWe) respecto al año 2005. Ello supone un incremento lineal anual del orden de 350 MWe durante el período 2005-2010, superior a los 200 MWe del período 2000-2005. En lo referente a generación, el incremento respecto al año 2005 fue del **20,7%**.

La tabla 4.4 y la Figura 4.6 reflejan la evolución quinquenal de la capacidad instalada a partir del año 1950, así como los datos de generación eléctrica anual, si bien estos últimos se limitan al período 1995-2010. Asimismo, el citado autor incluye una estimación de la potencia instalada para el año 2015 de **18.500 MWe**, basada en datos de proyectos existentes que se encuentran en fase ejecutiva. De cumplirse este pronóstico, la variación en el período 2010-2015 experimentaría un fuerte aumento del **72,7%** (7.785 MWe).

Tabla 4.4. Capacidad instalada (1950-2015) y producción eléctrica (1995-2010)

Año	Capacidad instalada		Electricidad producida	
	MW	Variación (%)	GWh	Variación (%)
1950	200			
1955	270	35,0		
1960	386	43,0		
1965	520	34,7		
1970	720	38,5		
1975	1.180	63,9		
1980	2.110	78,8		
1985	4.764	125,8		
1990	5.834	22,5		
1995	6.833	17,1	38.035	
2000	7.972	16,7	49.261	29,5
2005	8.933	12,1	55.709	13,1
2010	10.715	19,9	67.246	20,7
2015	18.500	72,7		

Figura 4.6. Evolución de la capacidad instalada y de la producción eléctrica



4.2.2 Distribución por países

El plano de la Figura 4.7 refleja la distribución por países de la potencia instalada en el año 2010, mientras que la Figura 4.8 hace lo propio con los valores de este parámetro previstos para el año 2015. Asimismo, la tabla 4.5 recoge la información detallada por países de la capacidad instalada y la producción eléctrica correspondientes a los años 2005 y 2010, así como la previsión para 2015.

Figura 4.7. Capacidad instalada en el año 2010 (10,7 GWe)

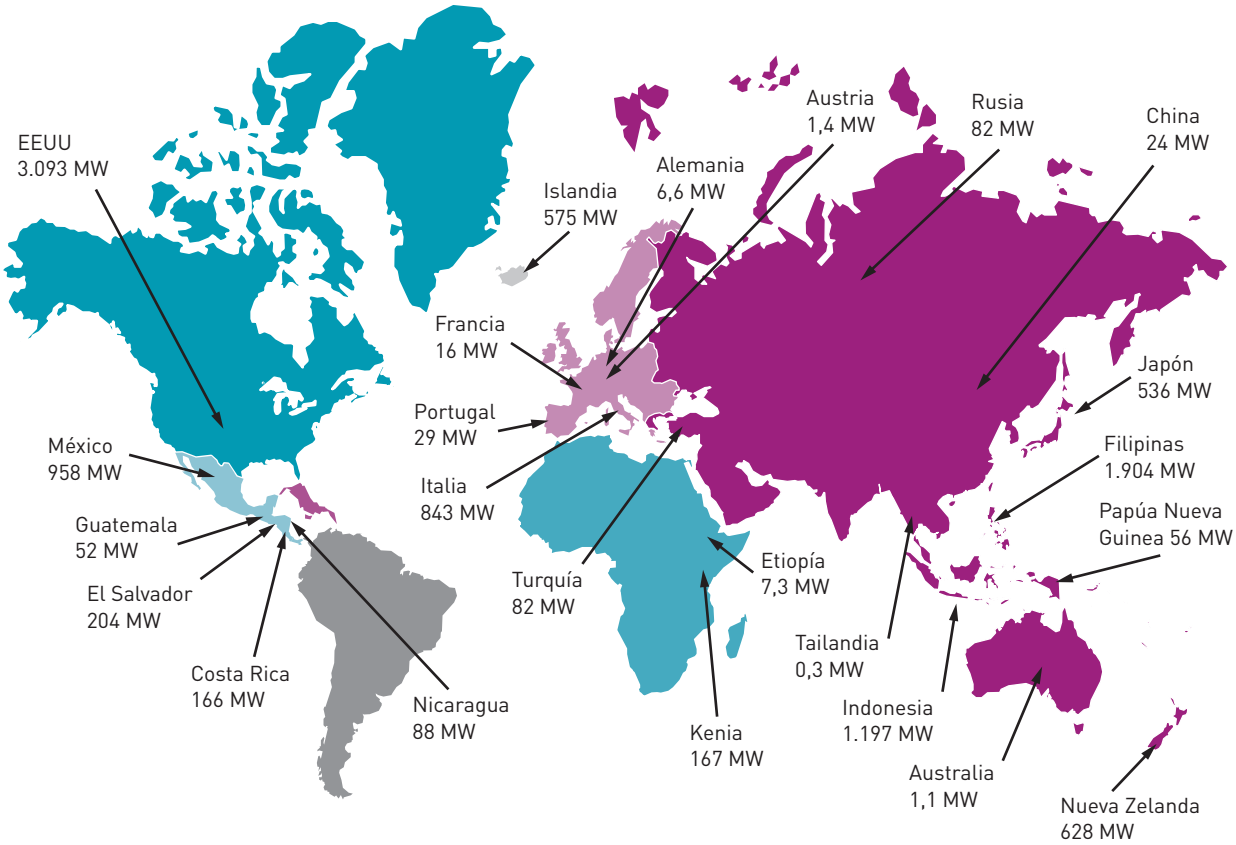


Figura 4.8. Capacidad instalada prevista para el año 2015 (18,5 GWe)

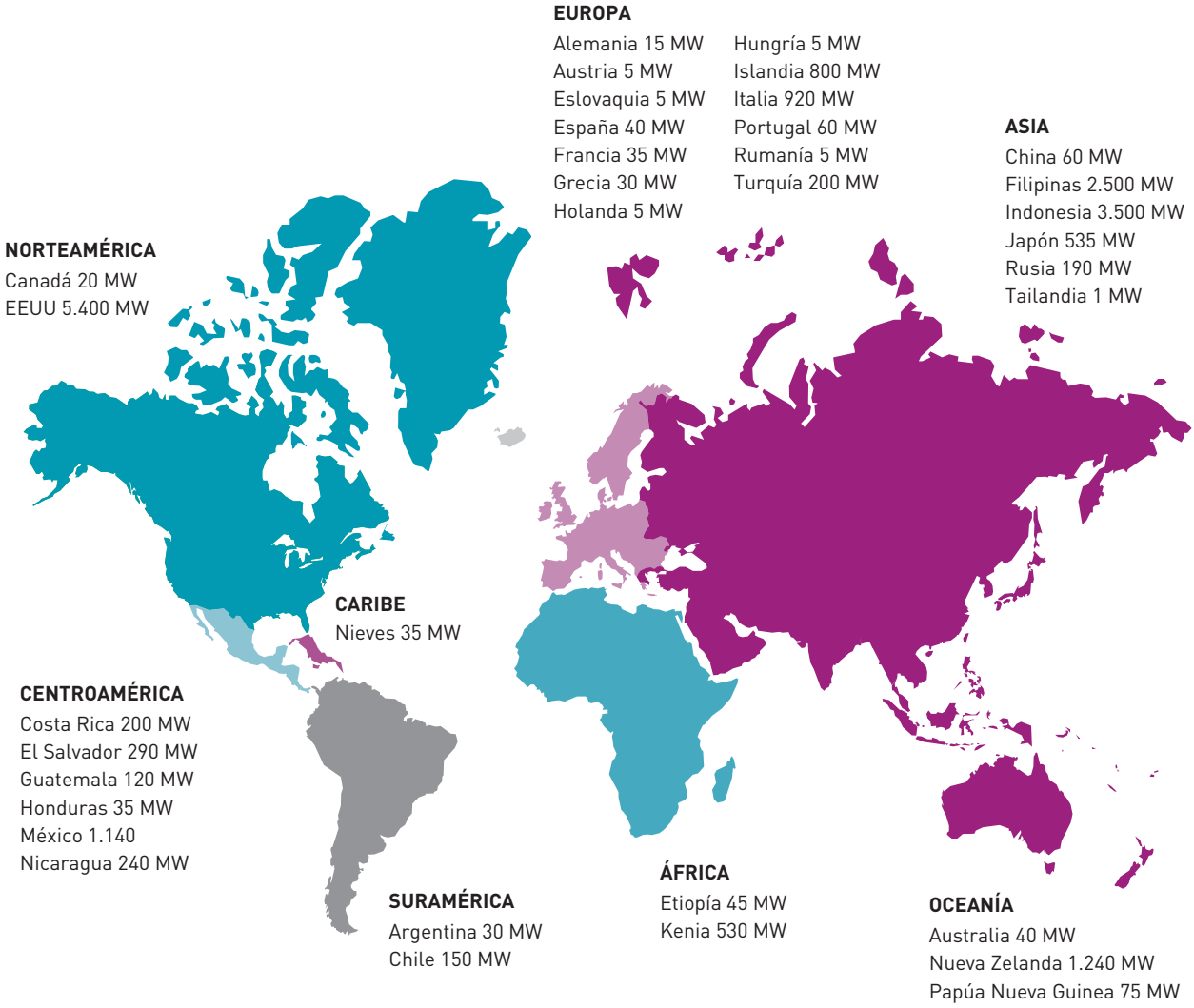


Tabla 4.5. Capacidad instalada y producción eléctrica por países (años 2005, 2010 y estimación para 2015)

País	Año 2005		Año 2010		Variación absoluta 2005-10		Variación relativa 2005-10		Capac. instal. año 2015 (MWe)
	Capac. instal. (MWe)	Prod. eléct. (GWh)	Capac. instal. (MWe)	Prod. eléct. (GWh)	Capac. (MWe)	Prod. (GWh)	Capac. (MWe) (%)	Prod. (GWh) (%)	
Alemania	0	2	7	50	6	49	2.774	324	15
Argentina	0	0	0	0	0	0			30
Australia	0	1	1	1	1	0	633	-5	40
Austria	1	3	1	4	0	1	27	19	5

(Continuación)

País	Año 2005		Año 2010		Variación absoluta 2005-10		Variación relativa 2005-10		Capac. instal. año 2015 (MWe)
	Capac. instal. (MWe)	Prod. eléct. (GWh)	Capac. instal. (MWe)	Prod. eléct. (GWh)	Capac. (MWe)	Prod. (GWh)	Capac. (MWe) (%)	Prod. (GWh) (%)	
Canadá	0	0	0	0	0	0			20
Chile	0	0	0	0	0	0			150
China	28	96	24	150	-4	54	-13	57	60
Costa Rica	163	1.145	166	1.131	3	-14	2	-1	200
El Salvador	151	967	204	1.422	53	455	35	47	290
Eslovaquia	0	0	0	0	0	0			5
España	0	0	0	0	0	0			40
Estados Unidos	2.564	16.840	3.093	16.603	530	-237	21	-1	5.400
Etiopía	7	0	7	10	0	10	0		45
Filipinas	1.930	9.253	1.904	10.311	-26	1.058	-1	11	2.500
Francia	15	102	16	95	2	-7	10	-7	35
Grecia	0	0	0	0	0	0			30
Guatemala	33	212	52	289	19	77	58	36	120
Holanda	0	0	0	0	0	0			5
Honduras	0	0	0	0	0	0			35
Hungría	0	0	0	0	0	0			5
Indonesia	797	6	1.197	9.600	400	3.515	50	58	3.500
Islandia	202	1	575	4.597	373	3.114	184	210	800
Islas Nevis	0	0	0	0	0	0			35
Italia	791	5.340	843	5.520	52	180	7	3	920
Japón	535	3.467	536	3.064	1	-404	0	-12	535
Kenia	129	1.088	167	1.430	38	342	29	31	530

(Continuación)

País	Año 2005		Año 2010		Variación absoluta 2005-10		Variación relativa 2005-10		Capac. instal. año 2015 (MWe)
	Capac. instal. (MWe)	Prod. eléct. (GWh)	Capac. instal. (MWe)	Prod. eléct. (GWh)	Capac. (MWe)	Prod. (GWh)	Capac. (MWe) (%)	Prod. (GWh) (%)	
México	953	6.282	958	7.047	5	766	1	12	1.140
Nicaragua	77	271	88	310	11	39	14	15	240
Nueva Zelanda	435	2.774	628	4.055	193	1.281	44	46	1.240
Papúa-Nueva Guinea	6	17	56	450	50	433	833	2.547	75
Portugal	16	90	29	175	13	85	78	94	60
Rumanía	0	0	0	0	0	0			5
Rusia	79	85	82	441	3	356	4	419	190
Tailandia	0	2	0	2	0	0	0	11	1
Turquía	20	105	82	490	62	385	308	368	200
Total	**8.933**	**55.709**	**10.715**	**67.246**	**1.783**	**11.538**	**20**	**21**	**18.500**

Los cinco países con valores más elevados de capacidad y producción son, por este orden, **Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México e Italia**. Dos de ellos –Estados Unidos e Indonesia– son también los que han experimentado el mayor incremento de capacidad instalada, en términos absolutos, durante el último quinquenio. Las tablas 4.6 y 4.7 recogen estos resultados.

Tabla 4.6. Relación de los 5 países con mayor capacidad instalada en 2010

País	Año 2005		Año 2010	
	MWe	GWh	País	GWh
Estados Unidos	2.564	16.840	3.060	14.533
Filipinas	1.930	9.253	1.904	10.311
Indonesia	797	6.085	1.197	9.600
México	953	6.282	958	7.047
Italia	791	5.340	843	5.520

Tabla 4.7. Relación de los 5 países con mayor incremento absoluto de su capacidad instalada respecto al año 2005

País	Variación 2005-2010			
	Capac. inst.		Prod. eléctrica	
	MWe	MWe (%)	GWh	GWh (%)
Estados Unidos	496	19	-2.307	-14
Indonesia	400	50	3.515	58
Islandia	373	184	3.114	210
Nueva Zelanda	193	44	1.281	46
Turquía	62	308	385	368

Los cuatro primeros países de esta última tabla han construido plantas de capacidad superior a 100 MWe, una circunstancia que merece destacarse puesto que revela su interés por seguir potenciando el uso de esta energía, respaldado por políticas de incentivos y otras medidas de apoyo que siguen manteniéndose pese a ser ya más de 50 los años transcurridos desde que iniciaron su actividad geotérmica.

En términos relativos, los cinco países que incrementaron en mayor proporción su capacidad instalada durante el período 2005-2010 fueron, por este orden, Alemania, Papúa-Nueva Guinea, Australia, Turquía e Islandia, si bien en esta clasificación Alemania y Australia resultan escasamente relevantes debido a su escasa capacidad instalada (tabla 4.8).

Tabla 4.8. Relación de los 8 países con mayor incremento relativo de su capacidad instalada respecto al año 2005

País	Capac. inst.		Prod. eléctrica	
	MWe	Variac. (%)	GWh	Variac. (%)
Alemania	6	2.774	49	3.249
Papúa-Nueva Guinea	50	833	433	2.547
Australia	1	633	0	-5
Turquía	62	308	385	368
Islandia	373	184	3114	210
Portugal	29	78	175	94
Guatemala	52	58	289	36
Indonesia	1.197	50	9.600	58

4.2.3 Número y características de las plantas actualmente en funcionamiento

El número de centrales geotérmicas de generación de electricidad actualmente en operación asciende a **526**, con una capacidad media de **20,6 MWe** y distribuidas en **24 países**. El 9,1% de las mismas –48 unidades– supera los 55 MWe, con una capacidad media de 79,5 MWe, mientras que un 41,6% –219 unidades– presenta potencias comprendidas entre 10 y 55 MWe. Las 259 unidades restantes (49,2% de las existentes) no superan los 10 MWe; su capacidad media es de 3,2 MWe.

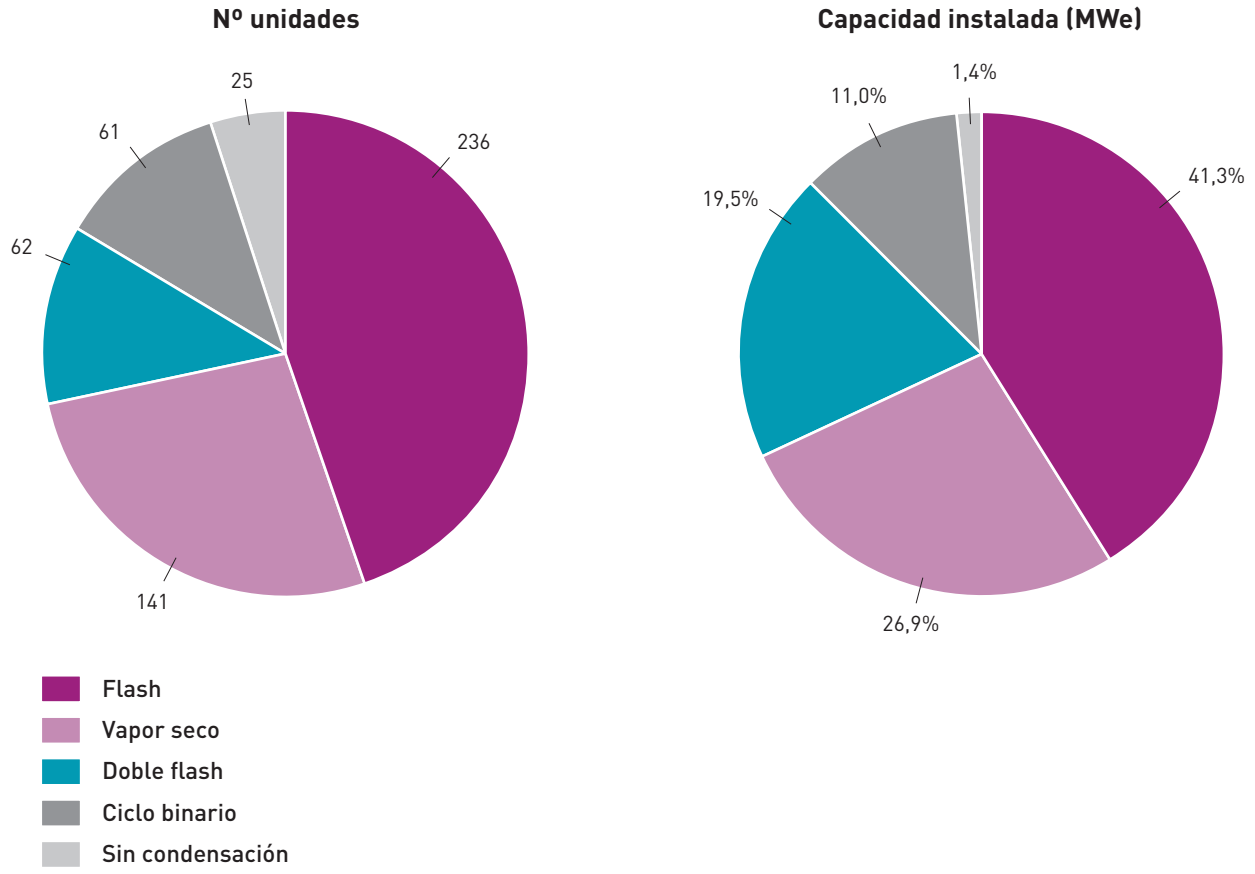
La tabla 4.9 refleja el número de unidades, la capacidad total instalada y su valor medio, así como la producción media para cada categoría de tecnología empleada (excluidas las de tipo híbrido). Según evidencian estos resultados, **las plantas de vapor seco se encuentran a la cabeza tanto en capacidad instalada como en producción eléctrica por unidad. Sin embargo, las de ciclo binario son las más numerosas, mientras que las de tipo flash son las que concentran el mayor valor de capacidad instalada** (Figura 4.9).

Tabla 4.9. Distribución de plantas geotérmicas por tecnologías

Tipo	Nº unidades	Capacidad instalada		Producción media (GWh/unidad)
		Total (MWe)	Media (MWe/unid)	
Sin condensación*	25	145	6	96
Ciclo binario	236	1.178	5	27
Flash	141	4.421	31	199
Doble flash	61	2.092	34	236
Vapor seco	62	2.878	46	260

*Esta denominación se corresponde en inglés con la de tipo *Back Pressure*

Figura 4.9. Número de unidades y capacidad instalada para diferentes tipos de tecnologías, excluidas las de tipo híbrido (año 2010)



La distribución por países del número de plantas y sus respectivas tecnologías de producción aparece reflejada en la tabla 4.10. Entre los cinco países con mayor capacidad instalada –Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México e Italia–, las tecnologías que concentran el mayor porcentaje de dicha capacidad son la de **vapor seco en el caso de Estados Unidos e Italia, de tipo flash en Filipinas e Indonesia y de doble flash en México** (tabla 4.11).

A título de resumen, la Figura 4.10 reproduce los diagramas recogidos en el ya citado artículo de R. Bertani, en los que se refleja la aportación de cada tecnología –incluyendo las de tipo híbrido– en términos de número de unidades, capacidad instalada y producción eléctrica. Según estos datos, la mayor capacidad instalada corresponde a la de tipo flash, con un 41% del total (4.421 MWe), seguida de la de vapor seco (27%), doble flash (20%), ciclo binario (11%) y sin condensación (1%). Las de tipo híbrido aparecen en todos los diagramas aunque con un valor del 0%, debido, probablemente, a la supresión por parte del autor de los decimales en estas representaciones.

Figura 4.10. Distribución mundial de las plantas de generación de energía eléctrica de origen geotérmico (año 2010)

Tabla 4.10. Distribución por países del número de plantas y sus respectivas tecnologías en el año 2010 (excluidas las de tipo híbrido)

País	Sin condensac.		Ciclo binario		Flash		Doble flash		Vapor seco		Total		Tecnología predomin.	
	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	Tipo	%
Alemania			7	3							7	3	Ciclo binario	100
Australia			1	2							1	2	Ciclo binario	100
Austria			1	3							1	3	Ciclo binario	100
China							24	8			24	8	Doble flash	100
Costa Rica	5	1	21	2	140	3					166	6	Flash	84,3
El Salvador			9	1	160	5	35	1			204	7	Flash	78,4
Estados Unidos			653	149	59	4	795	30	1.585	25	3.094	209	Vapor seco	51,2
Etiopía			7	2							7	2	Ciclo binario	100
Filipinas			209	18	1.330	31	365	7			1.904	56	Flash	69,9
Francia			2	1	10	1	5	1			16	3	Flash	62,5
Guatemala			52	8							52	8	Ciclo binario	100
Indonesia	2	1			735	14			460	7	1.197	22	Flash	61,4
Islandia			10	8	474	14	90	3			574	25	Flash	82,6
Italia					88	5			755	28	843	33	Vapor seco	89,6
Japón			2	2	349	14	160	3	24	1	535	20	Flash	65,2
Kenia			14	3	153	7					167	10	Flash	91,6
México	75	15	3	2	410	15	470	5			958	37	Doble flash	49,1
Nicaragua	10	2	8	1	70	2					88	5	Flash	79,5
Nueva Zelanda	47	5	137	24	290	12	100	1	55	1	628	43	Flash	46,2

(Continuación)

País	Sin condensac.		Ciclo binario		Flash		Doble flash		Vapor seco		Total		Tecnología predomin.	
	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	MWe	Uds	Tipo	%
Papúa-Nueva Guinea	6	1			50	2					56	3	Flash	89,3
Portugal			29	5							29	5	Ciclo binario	100
Rusia					82	11					82	11	Flash	100
Tailandia							0	1			0	1	Doble flash	100
Turquía			14	2	20	1	47	1			82	4	Doble flash	57,3
Total	**145**	**25**	**1.178**	**236**	**4.421**	**141**	**2.092**	**61**	**2.878**	**62**	**10.715**	**526**	**Flash**	**41,3**

Tabla 4.11. Tecnologías predominantes en los 5 países con mayor capacidad instalada (año 2010)

País	Capacidad instalada (MWe)	Tecnología predominante		
		Tipo	Capac. instalada (MWe)	% respecto a la capacidad total
Estados Unidos	3.060	Vapor seco	1.585	51,2
Filipinas	1.904	Flash	1.330	69,9
Indonesia	1.197	Flash	735	61,4
México	958	Doble flash	430	49,1
Italia	843	Vapor seco	755	89,6

4.2.4 Previsiones de crecimiento de la energía geotérmica

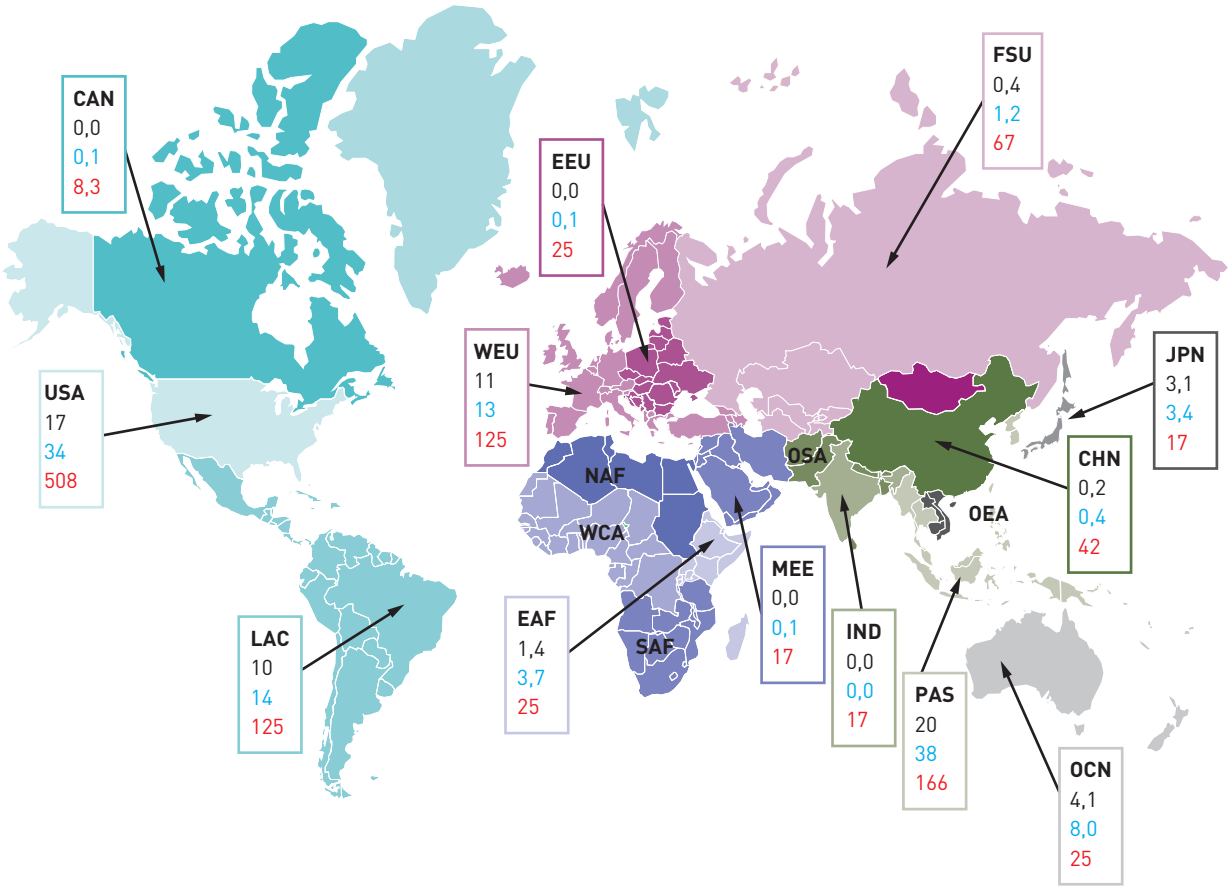
La tabla 4.12 refleja las previsiones de evolución de la producción eléctrica de origen geotérmico en dos escenarios temporales: 2015 y 2050, según la clasificación mundial en 18 regiones establecida por la *Global Energy Assessment* (GEA), entidad gestionada por el *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA), bajo el patrocinio de las Naciones Unidas y la *World Energy Conference* (WEC). Asimismo, dicha tabla recoge también la producción correspondiente a los años 2000, 2005 y 2010, todas ellas expresadas en TWh/año. Estos datos revelan ratios de crecimiento en un rango hasta de dos dígitos en algunas regiones. A finales de 2010, la energía geotérmica habrá suministrado 67 TWh/año de electricidad, valor que se incrementaría hasta los 116 TWh/año en 2015 y a 1.167 TWh/año en el año 2050 según estas previsiones (Figura 4.11).

Tabla 4.12. Utilización presente y futura de la energía geotérmica en las 18 regiones GEA

Región GEA*	Electricidad (TWh/año)				
	2000	2005	2010	2015	2050
Estados Unidos	14,0	16,8	16,6	34,1	508,0
Canadá	0,0	0,0	0,0	0,1	8,3
Europa Occidental	3,9	7,1	10,9	13,3	125,0
Europa Central/Oriental	0,0	0,0	0,0	0,1	25,0
ex-Unión Soviética	0,0	0,1	0,4	1,2	67,0
Norte de África	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
África Oriental	0,4	1,1	1,4	3,7	25,0
África Central/Occidental	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
África Meridional	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oriente Medio	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0
China	0,1	0,1	0,2	0,4	42,0
Asia Oriental	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
India	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0
Asia Meridional	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Japón	1,7	3,5	3,1	3,4	17,0
Pacífico asiático (otros)	8,3	15,4	20,4	37,8	166,0
Oceanía	2,4	2,8	4,1	8,0	25,0
América Latina	7,3	8,9	10,2	14,0	125,0
Mundo	38,0	56,0	67,0	116,0	1.167,0

*Global Energy Assessment (GEA)

Figura 4.11. Previsiones de producción de electricidad en las 18 regiones GEA en TWh/año. Negro = año 2010, Azul = año 2015, Rojo = año 2050. Los valores representados corresponden a unas capacidades efectivas de 10,7 GWe en 2010, 18,4 GWe en 2015 y 140 GWe en 2050 (suponiendo una contribución del EGS de 70 GWe)



No obstante, en lo referente a la cuantificación del potencial geotérmico global, Bertani señala la existencia de discrepancias de varios órdenes de magnitud entre diferentes autores, relacionadas básicamente con los sistemas EGS y/o con el tipo y funcionamiento de las tecnologías de aprovechamiento. Por ejemplo, la generación de electricidad a baja temperatura mediante las plantas de ciclo binario abre una nueva vía a los países que no cuentan con yacimientos de alta temperatura. En lo referente a la tecnología EGS, si bien se encuentra aún en fase de desarrollo, no cabe duda que su aplicación a escala comercial generaría un enorme potencial de desarrollo de la geotermia en numerosos países.

Finalmente, incluye Bertani en su artículo una interesante valoración acerca del potencial geotérmico de cada una de las 18 regiones GEA, cuyos resultados aparecen recogidos en la tabla 4.13. Estos últimos están referidos al calor almacenado disponible tanto para usos directos como para generación de electricidad, a excepción de los valores de la columna de producción eléctrica, calculados empleando una media ponderada para la eficiencia de conversión (aproximadamente 17 julios de calor por cada julio de electricidad) y un factor de capacidad del 95%. En el caso de la utilización de calor para usos directos, el factor de capacidad empleado es del 40%.

Tabla 4.13. Potencial geotérmico de las 18 regiones GEA (expresado en exajulios, 1 EJ = 10^9 GJ)

Región GEA*	Potencial teórico	Potencial técnico		Potencial económico		
		Calor para usos directos	Calor para electricidad	Calor para usos directos	Calor para electricidad	Producción eléctrica
	10^6 EJ	EJ/año	EJ/año	EJ/año	EJ/año	TW/año
Estados Unidos	4,738	7,0	75	1,215	34,9	508
Canadá	3,287	4,8	52	0,099	0,307	8,3
Europa Occidental	2,019	3,0	32	4,311	6,216	125
Europa Central/Oriental	0,323	0,5	5,1	0,852	1,243	25
ex-Unión Soviética	6,607	9,9	104	0,508	3,097	67
Norte de África	1,845	2,8	29	0,103	0,0	0,0
África Oriental	0,902	1,3	14	0,004	0,918	25
África Central/Occidental	2,103	3,2	33	0,0	0,0	0,0
África Meridional	1,233	1,8	19	0,0	0,0	0,0
Oriente Medio	1,355	2,0	21	0,175	0,612	17
China	3,288	4,7	52	1,764	1,856	42
Asia Oriental	0,216	0,3	3,4	0,018	0,0	0,0
India	0,938	1,4	15	0,062	0,613	17
Asia Meridional	2,424	3,7	38	0,002	0,0	0,0
Japón	0,182	0,2	2,9	0,201	0,612	17
Pacífico asiático (otros)	1,092	1,4	17	0,004	7,424	166
Oceanía	2,304	3,5	36	0,391	1,568	25
América Latina	6,886	9,9	109	0,383	6,216	125
Mundo	**41,743**	**61,4**	**657**	**10,092**	**65,582**	**1.167**
Capacidad equivalente		**5.000 GWt**	**1.200 GWe**	**800 GWt**	**140 GWe**	

*Global Energy Assessment (GEA)

5 Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos

5.1 GENERALIDADES

El contexto energético actual y la creciente sensibilización ambiental de la sociedad han convertido a las energías renovables, junto con el ahorro y la eficiencia energética, en una de las principales opciones para dar respuesta a los problemas planteados para satisfacer las necesidades de suministro energético demandadas por la población. Según consta en el *Manual de geotermia* editado por el IDAE[3], se consideran *renovables* las fuentes energéticas primarias que tienen su origen en la radiación solar, ya sea de forma directa como la solar térmica o la fotovoltaica, o de forma indirecta como la eólica, la hidroeléctrica y la biomasa. Entre ellas también se incluye la energía geotérmica, que, a diferencia del resto de energías renovables, proviene del calor interior de la Tierra, que tiene su origen en los movimientos diferenciales entre las distintas capas que la constituyen –principalmente, entre manto y núcleo–, en el calor inicial que se liberó durante su formación –que aún está llegando a la superficie–, en la desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza y en el manto –básicamente, uranio 235, uranio 238, torio 282 y potasio 40–, y en el calor latente de cristalización del núcleo externo.

En el ámbito europeo, la aprobación, en junio de 2009, de la nueva Directiva Europea de Energías Renovables –*Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*– supone un importante respaldo al desarrollo de la energía térmica a partir de fuentes renovables en general, y de la energía geotérmica en particular.

5.1.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica es, en su sentido más amplio, la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre.

En la *Directiva 2009/28/CE*, se define como *la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida (Artículo 2)*. Esta definición coincide con la recogida en la *Declaración de Bruselas de 2009 del Consejo Europeo de Energía Geotérmica* (EGEC), que establece que la energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la Tierra. Según figura en dicha Declaración, se trata de una fuente de energía sostenible, renovable, casi infinita, que proporciona calor y electricidad las 24 horas del día a lo largo de todo el año.

La energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia, pero no el contenido en masas de agua superficiales, continentales o marinas.

5.1.2 Gradiente geotérmico

Se define como el incremento de temperatura registrado al profundizar desde la capa más externa de la Tierra –la corteza– hacia las partes interiores de la misma. El gradiente geotérmico observado en la mayor parte del Planeta, conocido como *gradiente térmico normal*, es de unos 2,5-3 ºC cada 100 metros, si bien en regiones muy delimitadas y específicas, el incremento de la temperatura con la profundidad es muy superior al indicado. Estas regiones, de *gradiente geotérmico anómalo*, se sitúan sobre áreas geológicamente activas de la corteza terrestre.

El gradiente geotérmico permite estimar el flujo de calor que se transmite desde las zonas internas de la corteza hacia las externas. Representa la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie y se expresa en mW/m^2.

5.1.3 Fluido geotérmico

El calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, por lo que es necesario disponer de un fluido para transportarlo hasta la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales o intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad en el subsuelo. El fluido geotérmico –líquido caliente rico en sales minerales y/o vapor– es, generalmente, agua.

Una vez en superficie, el fluido geotérmico, en función de su contenido de calor, se destinará, si es posible, a la producción de energía eléctrica;

[3]IDAE-IGME. Manual de geotermia. Junio 2008

en caso contrario, su calor se aprovechará directamente, utilizando intercambiadores o bombas de calor.

Las características del fluido geotérmico, incluidas las químicas, la temperatura y el contenido de gases no condensables, pueden influir en el diseño del sistema de aprovechamiento en especial de las centrales eléctricas.

5.1.4 Recurso geotérmico

Se define el recurso geotérmico como la fracción de la energía geotérmica que puede ser aprovechada de forma técnica y económicamente viable. Incluye, no sólo los recursos actualmente conocidos y cuyo aprovechamiento es factible desde los dos puntos de vista considerados, sino también los que lo serán en un futuro relativamente próximo.

El concepto de recurso geotérmico es tan amplio que incluye desde el calor que puede encontrarse en los horizontes más superficiales del suelo hasta el almacenado en rocas situadas a las profundidades que podrían alcanzarse con técnicas de perforación de pozos petrolíferos.

En cuanto a sus tipos, los recursos geotérmicos se clasifican según su nivel térmico –o lo que es lo mismo, su entalpía[4]–, factor que condiciona claramente su aprovechamiento. Los valores de temperatura establecidos como límite para su diferenciación pueden variar según los autores. Los admitidos por la *Plataforma Tecnológica Española de Geotermia* (GEOPLAT), siguiendo las últimas tendencias, son los que se indican en la siguiente clasificación:

- **Recursos geotérmicos de alta entalpía** (T > 150 ºC). Se encuentran principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados y se sitúan a profundidades muy variables (son frecuentes entre 1.500 y 3.000 m). Están constituidos por vapor seco (muy pocos casos) o por una mezcla de agua y vapor, y se aprovechan fundamentalmente para la producción de electricidad.
- **Recursos geotérmicos de media entalpía** (T: 100-150 ºC). Pueden localizarse en zonas con un gradiente geotérmico elevado a profundidades inferiores a los 2.000 m, y en cuencas sedimentarias a profundidades entre los 3.000 y 4.000 m. Su temperatura permite el uso para la producción de electricidad mediante ciclos binarios. También pueden aprovecharse para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y en procesos industriales.
- **Recursos geotérmicos de baja entalpía** (T: 30-100 ºC). Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.500 y 2.500 m, o a profundidades inferiores a los 1.000 m en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Su utilización se centra en los usos térmicos en sistemas de calefacción/climatización y ACS urbanos, y en diferentes procesos industriales. Los fluidos geotérmicos raras veces se utilizan directamente, lo más frecuente es el aprovechamiento de su energía mediante intercambiadores y/o bombas de calor. Suelen requerir una demanda importante de energía calorífica en las proximidades.
- **Recursos geotérmicos de muy baja entalpía** (T < 30 ºC). Las temperaturas de estos recursos suelen acercarse a la media anual del lugar donde se captan. Corresponden a la energía térmica almacenada en las aguas subterráneas, incluidas las provenientes de labores mineras y drenajes de obras civiles, siempre para uso exclusivamente energético y no consuntivo del agua, y en el subsuelo poco profundo (normalmente, a menos de 200 m, incluyendo las captaciones de calor asociadas a elementos constructivos de la edificación). En este último caso, la energía renovable puede captarse de manera muy eficiente dada la estabilidad térmica del subsuelo frente a la oscilación estacional del ambiente, como consecuencia de la transmisión de calor hacia la zonas más externas de la corteza. Dicha transmisión hace posible que, a partir de 8-10 m de profundidad, la temperatura del terreno se mantenga prácticamente estable durante todo el año. Su aplicación son los usos directos del calor: aporte energético a sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración de locales y/o procesos, con o sin utilización de una bomba de calor.

5.1.5 Yacimiento geotérmico

Espacio físico en el interior de la corteza terrestre con unas determinadas condiciones geológicas, en el que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es económicamente viable.

[4]Cantidad de energía térmica que un fluido puede intercambiar con entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg

Los yacimientos geotérmicos pueden clasificarse según diferentes criterios: contexto geológico, nivel de temperatura, modo de explotación y tipo de utilización. Lo habitual es clasificarlos en función del nivel térmico de los fluidos que contienen, es decir, de los recursos que albergan, adoptándose los mismos intervalos de temperatura considerados para éstos:

- **Yacimientos de alta entalpía**, en los que el fluido se encuentra en condiciones de presión y alta temperatura (> 150 ºC).
- **Yacimientos de media entalpía**, en los que el fluido se encuentra a temperaturas entre 100 y 150 ºC.
- **Yacimientos de baja entalpía**, en los que la temperatura del fluido varía entre 30 y 100 ºC.

Para el caso de energía geotérmica de muy baja temperatura no suele utilizarse el término yacimiento, ya que este recurso se encuentra difuso en toda la superficie terrestre.

Además, hay que considerar los yacimientos geotérmicos *no convencionales*, que constituyen casos singulares de los yacimientos de alta entalpía (T > 150 ºC). Se trata de los siguientes:

- **Yacimientos de roca caliente seca** (HDR: *Hot Dry Rock*), creados, mediante la acción del hombre, en materiales geológicos de escasa o nula permeabilidad y/o porosidad existentes en condiciones de alta temperatura y a profundidades no muy elevadas, carentes de fluido. El calentamiento de estos materiales se debe a su proximidad a cámaras magmáticas en áreas volcánicas. Las técnicas empleadas persiguen la creación, en el macizo de roca profundo y caliente, de una red de fracturas que permitan la formación de una zona de intercambio térmico –almacén artificial–, por la que se hace circular un fluido inyectado desde la superficie, que retorna a ésta con un elevado incremento de su temperatura. La fracturación se consigue inyectando, a través de un pozo, grandes volúmenes de agua a elevada presión, en un proceso denominado hidrofracturación o fracturación hidráulica, usado frecuentemente en la producción de petróleo y gas. La distribución en profundidad del sistema de fracturas creado puede modelizarse usando métodos sísmicos de prospección geofísica, al objeto de determinar la ubicación del pozo de extracción del agua caliente, que se enviará a una central de ciclo binario para la producción de energía eléctrica y posteriormente se reinyectará en el yacimiento.

  Los resultados obtenidos en la creación de yacimientos geotérmicos de roca caliente seca han abierto la posibilidad de aplicar las técnicas de fracturación indicadas a yacimientos de baja permeabilidad en producción, con objeto de incrementar las reservas geotérmicas y la productividad. Sería el caso de los **yacimientos de roca caliente fracturada** (HFR: *Hot Fractured Rock*), que contienen un fluido caliente y presentan fracturas que pueden estimularse artificialmente para aumentar la recuperación de energía. Estos yacimientos en los que es precisa la intervención directa del hombre para su creación y/o estimulación activa, son también denominados **Sistemas Geotérmicos Estimulados** (EGS: *Enhanced Geothermal System*).
- **Yacimientos geotérmicos supercríticos** (T > 300 ºC), cuya investigación se viene desarrollando en los últimos tiempos, en los que las condiciones termodinámicas permitirían la producción de electricidad y también la de hidrógeno. Los recursos asociados –volcánicos profundos o supercríticos– están calentados por el magma subsuperficial en regiones volcánicas. La tecnología necesaria para este tipo de recursos supone el desarrollo de equipos que puedan funcionar adecuadamente y durante largos períodos de tiempo a temperaturas extremadamente elevadas.
- **Yacimientos geopresurizados,** en los que el agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones (entre un 40% y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad a la que se halla) y se encuentra casi completamente sellada para el intercambio con las rocas circundantes. Además de la energía térmica del agua geotermal, los sistemas geopresurizados también contienen energía mecánica como consecuencia del exceso de presión del fluido, así como cierto potencial de energía de combustión, ya que, normalmente, se encuentran cantidades importantes de metano (gas natural) disueltas en el agua geotermal. La mayor parte de la energía térmica de los yacimientos geopresurizados es resultado de la contribución, aproximadamente a partes iguales, de la temperatura del agua y del metano disuelto. Los yacimientos geopresurizados se forman generalmente en cuencas sedimentarias más que en áreas volcánicas. De hecho, se han descubierto como consecuencia de exploraciones petrolíferas en cuencas sedimentarias con gradiente geotérmico normal, pero en las que el agua se encuentra a una profundidad

de 6.000 m o mayor y, por tanto, a temperaturas superiores a 150 ºC. Actualmente, ninguno se encuentra en explotación, ya que las condiciones económicas para ello no son favorables. Puede citarse como ejemplo el yacimiento situado en la zona costera del Golfo de Texas-Louisiana, el más importante de esta naturaleza localizado en Estados Unidos.
Con los avances de la tecnología geotérmica y el aumento de los precios de los combustibles fósiles, estos sistemas, históricamente no viables desde el punto de vista económico, podrían llegar a convertirse en una fuente significativa tanto de gas natural como de energía geotérmica.

Los Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS), sólo utilizan la energía almacenada en la roca –ya que el agua debe adicionarse como un fluido secundario externo–, también se conocen como sistemas petrotermales, y se usan fundamentalmente para la producción de electricidad. Por el contrario, los aprovechamientos hidrotermales de la energía geotérmica, referidos tanto a acuíferos calientes asociados a cuencas sedimentarias profundas (HSA: *Hot Sedimentary Acuifer*) como a sistemas convectivos magmáticos en entornos volcánicos, suponen la utilización del agua presente de forma natural en el yacimiento considerado.

La transición entre sistemas hidrotermales y petrotermales es gradual. Existe consenso general en aceptar que un proyecto se puede considerar EGS cuando no es posible obtener índices del flujo procedente del yacimiento natural económicamente viables, de modo que es necesaria una estimulación hidráulica para crear vías de circulación para el fluido inyectado.

5.2 TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO

Como ya se ha indicado, el tipo de recurso geotérmico –alta y media o baja entalpía, básicamente– determina sus posibilidades de aprovechamiento, las cuales varían en función de las tecnologías disponibles en cada momento. No obstante, pueden establecerse dos tipos principales de aplicaciones o aprovechamientos:

- **Producción de electricidad**, para los **recursos geotérmicos de alta y media entalpía**, incluidos los sistemas geotérmicos estimulados.
- **Usos directos del calor** –calefacción y refrigeración, redes de climatización de distrito, ACS y aplicaciones en agricultura (invernaderos, secado de productos agrarios, etc.), acuicultura (piscifactorías, producción de algas, etc.), procesos industriales y balneoterapia (spas y otros)–, para los **recursos de baja y muy baja entalpía**.

Las tecnologías aplicadas en cada caso varían en función del tipo de recurso que se pretende utilizar, de su profundidad y del aprovechamiento previsto.

5.2.1 Tecnologías aplicables para la obtención de electricidad

En líneas generales, la energía geotérmica que se utiliza para generar electricidad puede obtenerse a partir de tres tipos distintos de fluidos que representan, a su vez, tres tipos de recursos diferentes:

- **Recursos de vapor seco**, que corresponden a los denominados sistemas de vapor dominante, en los que no hay –o es muy escasa– fase líquida asociada. The Geysers, en California o Lardarello en Italia, son ejemplos de estos sistemas hidrotermales de alta temperatura, donde los poros de las rocas están más saturados por vapor que por agua líquida. Los sistemas de vapor dominante no requieren la separación del vapor del agua, por lo que la energía que contienen es relativamente fácil de aprovechar de un modo eficiente. Esta circunstancia los convierte en los más favorables para la producción de energía eléctrica, si bien, comparativamente, son los menos frecuentes.
- **Recursos de vapor húmedo**, pero de alta entalpía, que corresponden a sistemas hidrotermales de agua caliente capaces de producir vapor que se aprovecha directamente para generar electricidad. En estos sistemas, el fluido es total o mayoritariamente líquido, pero se transforma en una mezcla de vapor y agua líquida cuando asciende y se descarga a través de los pozos de producción. Existen multitud de ejemplos de este tipo de aprovechamiento.
- **Recursos de moderada entalpía**, correspondientes a sistemas que producen fluido que no llega a transformarse en una mezcla de vapor y líquido, de modo que el transporte del calor sólo se realiza a través de la fase líquida. Sin embargo, pese a que estos sistemas hidrotermales no son capaces de producir vapor a una presión lo

suficientemente alta para su aprovechamiento directo en la generación de electricidad, se encuentran a una temperatura lo bastante elevada como para producir, mediante un intercambiador que incorpora un segundo fluido –fluido secundario o *de trabajo*– un vapor a alta presión capaz de mover un sistema turbina-generador. Esta técnica de producción eléctrica, en la que el calor geotérmico se transfiere a otro fluido con una temperatura de vaporización inferior a la del agua, se conoce como ciclo binario. Un sistema de las características indicadas se encuentra cerca de Mammoth Lakes, al este de Sierra Nevada, en California.

Los aspectos tecnológicos que controlan la explotación geotérmica de alta y moderada entalpía con el propósito considerado son dos: la extracción de la energía calorífica y su transformación a una forma de energía utilizable. Es importante señalar que, a medida que disminuye el nivel térmico del recurso, aumenta el consumo específico de la central de generación eléctrica, disminuyendo rápidamente su rendimiento neto.

Del mismo modo que las características del yacimiento geotérmico –tipo, dimensiones, capacidad de renovación del fluido que contiene, etc.– condicionan el diseño del modelo de gestión del campo geotérmico, las propiedades del fluido –temperatura y presión, fase en la que se encuentra, salinidad, naturaleza de los elementos disueltos en él, etc.– determinan los aspectos tecnológicos relacionados con el equipamiento de la central de generación.

Existen tres tipos de plantas para generar energía eléctrica procedente de recursos geotérmicos, en función de las características y la naturaleza del fluido geotermal disponible (descritos anteriormente) y de su profundidad:

- **Plantas de vapor seco**, que utilizan un flujo directo de vapor geotérmico.
- **Plantas flash** –hasta ahora, las más habituales–, que utilizan una mezcla de agua líquida y vapor.
- **Plantas de ciclo binario**, que funcionan como sistemas de circuito cerrado que aprovechan recursos de media temperatura. El ciclo Rankine es el ciclo binario comercial que se emplea en Estados Unidos.

Hay que considerar, además, las **plantas de ciclo combinado**, que aprovechan los beneficios de las tecnologías binaria y flash.

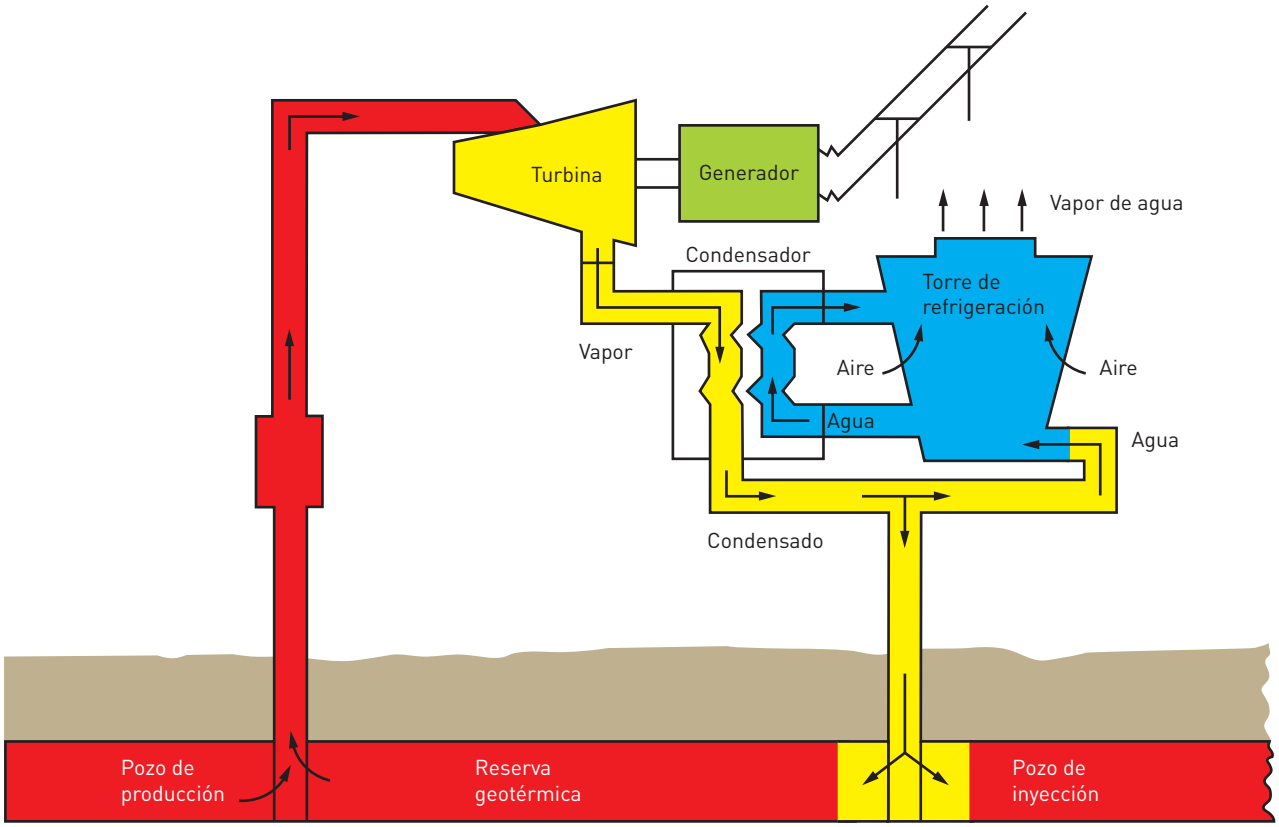
5.2.1.1 Plantas de vapor seco

Se trata de plantas en operación desde hace más de cien años –más que cualquier otra tecnología de conversión geotérmica–, que utilizan recursos de vapor seco. El fluido que llega a la superficie, procedente de las fracturas del suelo, es vapor en estado de saturación o ligeramente recalentado (vapor seco), que se dirige directamente a una turbina para producir electricidad. Los costes de producción de la planta, al generarse electricidad de forma directa, resultan muy bajos.

Los sistemas de vapor seco son relativamente simples: sólo requieren vapor, un pozo para la inyección del condensado y un mínimo de dispositivos de limpieza del vapor. Necesitan, además, un colector para retirar sólidos de gran tamaño, un centrifugador para separar el condensado y las partículas sólidas de pequeño tamaño, puntos para el drenaje del condensado a lo largo de las tuberías y, finalmente, un filtro para eliminar partículas pequeñas y sólidos disueltos. El esquema de funcionamiento de este tipo de plantas, que se refleja en la Figura 5.1, sigue siendo similar al de la primera instalación que operó en 1904 en Larderello (Italia). No obstante, los crecientes avances tecnológicos continúan mejorando estos sistemas.

Actualmente, algo menos del 40% de la electricidad geotérmica que se produce en Estados Unidos tiene su origen en este tipo de plantas, todas localizadas en The Geysers (California). En Matsukawa (Japón), éste es también el proceso utilizado.

Figura 5.1. Esquema de funcionamiento de una planta de vapor seco



Fuente: KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology*. Geothermal Energy Association. January 2008

Existen plantas que explotan yacimientos de vapor seco que utilizan un ciclo directo sin condensación, más simple y más barato en lo que a costes de la instalación respecta. En ellas, el vapor procedente del pozo pasa directamente a la turbina, desde donde se libera a la atmósfera. Estas instalaciones suelen emplearse como plantas piloto, para pequeños suministros locales a partir de pozos de producción aislados o como pequeñas centrales de punta. Su uso es obligado cuando el contenido en gases no condensables es superior al 50% o cuando el contenido total de gases excede del 10%, por el alto costo que supondría su separación en los condensadores. Las turbinas sin condensación pueden llegar a consumir doble cantidad de vapor por kilovatio producido que las unidades con condensación, las más utilizadas en las centrales geotérmicas.

Algunas veces, como en el caso de las primeras unidades de Larderello (Italia), no es posible el paso directo del vapor a las turbinas, debido a su naturaleza corrosiva. En estas situaciones, la tecnología aplicable se basa en un ciclo indirecto con condensación y recuperación de aguas mineralizadas, en el que el vapor que se envía a la turbina es un vapor limpio, al que ha cedido su energía el procedente del pozo. Este sistema prácticamente no se utiliza desde mediados del siglo XX, debido a la aparición de otros métodos de producción más económicos de los minerales recuperados (principalmente, ácido bórico y amoníaco, cuyo valor había hecho competitivo al sistema hasta entonces, pese al excesivo gasto energético que suponía) y a los nuevos materiales empleados en la construcción de las turbinas, capaces de resistir la presencia de productos corrosivos en el vapor.

5.2.1.2 Plantas flash

Son las indicadas para el aprovechamiento del recurso geotérmico de alta entalpía más común, consistente en una mezcla de vapor y salmuera. Normalmente, utilizan recursos que se encuentran a temperaturas situadas entre 180 y 250 ºC. El fluido que llega a la superficie es una mezcla vapor-líquido, a una presión que depende del pozo y de la temperatura del estado de saturación, por lo que es preciso, en primer lugar, separar ambas fases. Para ello, el fluido se conduce a unos separadores vapor/agua, desde donde la fracción vapor resultante se envía a una turbina para producir electricidad. La fracción líquida (salmuera), que se rechaza, puede utilizarse en otras aplicaciones, como agricultura y procesos de calor industriales, haciendo uso de la técnica conocida como *producción en cascada*.

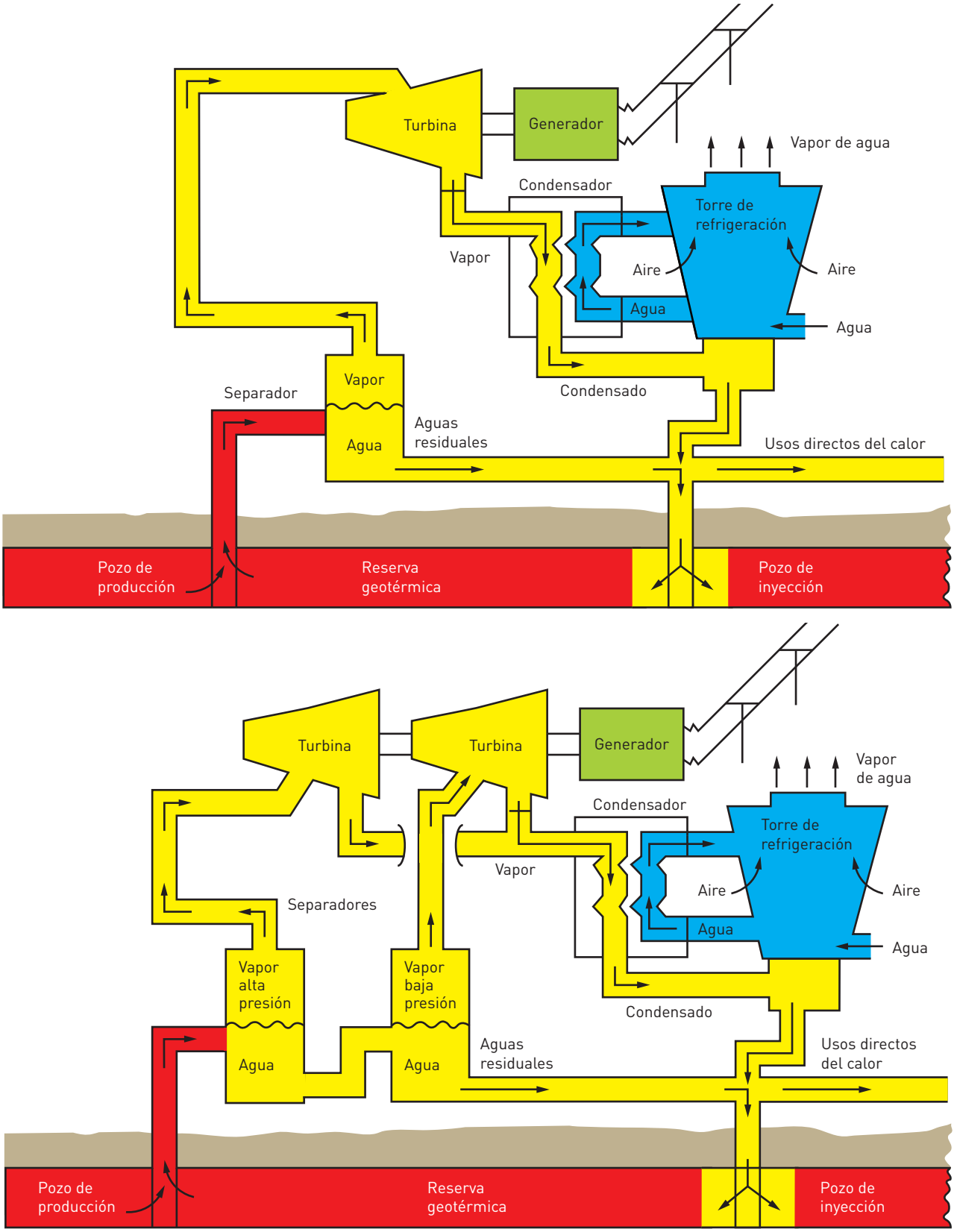
El ciclo flash puede constar de una o varias etapas, tantas como permita la entalpía del agua separada. Los sistemas de vapor doble-flash pasan la salmuera caliente por sucesivos separadores que se encuentran cada vez a menor presión. El vapor separado a baja presión de dicha salmuera se envía a una turbina de baja presión o a la zona de baja de una turbina multietapas. Las ventajas de este sistema incluyen la mejora de la eficiencia total del ciclo y el mayor aprovechamiento del recurso geotérmico, aunque a cambio de un incremento del coste de producción y de concentrar los componentes químicos que pudieran estar presentes en el agua geotermal. En Wairakei (Nueva Zelanda), existen plantas con ciclo de doble flash.

El tratamiento del vapor es una parte importante del ciclo de funcionamiento de las plantas flash, en las que los separadores utilizados tienen por objeto aislar y purificar el vapor geotérmico antes de enviarlo a la turbina. Un sistema flash requiere varias etapas de separación y limpieza, que incluyen un separador inicial que aísla el vapor del líquido geotérmico, depósitos de goteo a lo largo de la línea de vapor y, finalmente, un filtro/separador de limpieza. A veces, se añade un proceso de lavado del vapor para incrementar su pureza.

Todas las centrales geotérmicas tienen que disponer de sistemas de tuberías para el transporte de agua o vapor con el fin de completar el ciclo de producción eléctrica e inyección.

En la Figura 5.2, se muestran los esquemas de funcionamiento de las plantas flash y doble-flash.

Figura 5.2. Esquemas de funcionamiento de plantas flash (arriba) y doble-flash (abajo)



Fuente: KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology.* Geothermal Energy Association. January 2008

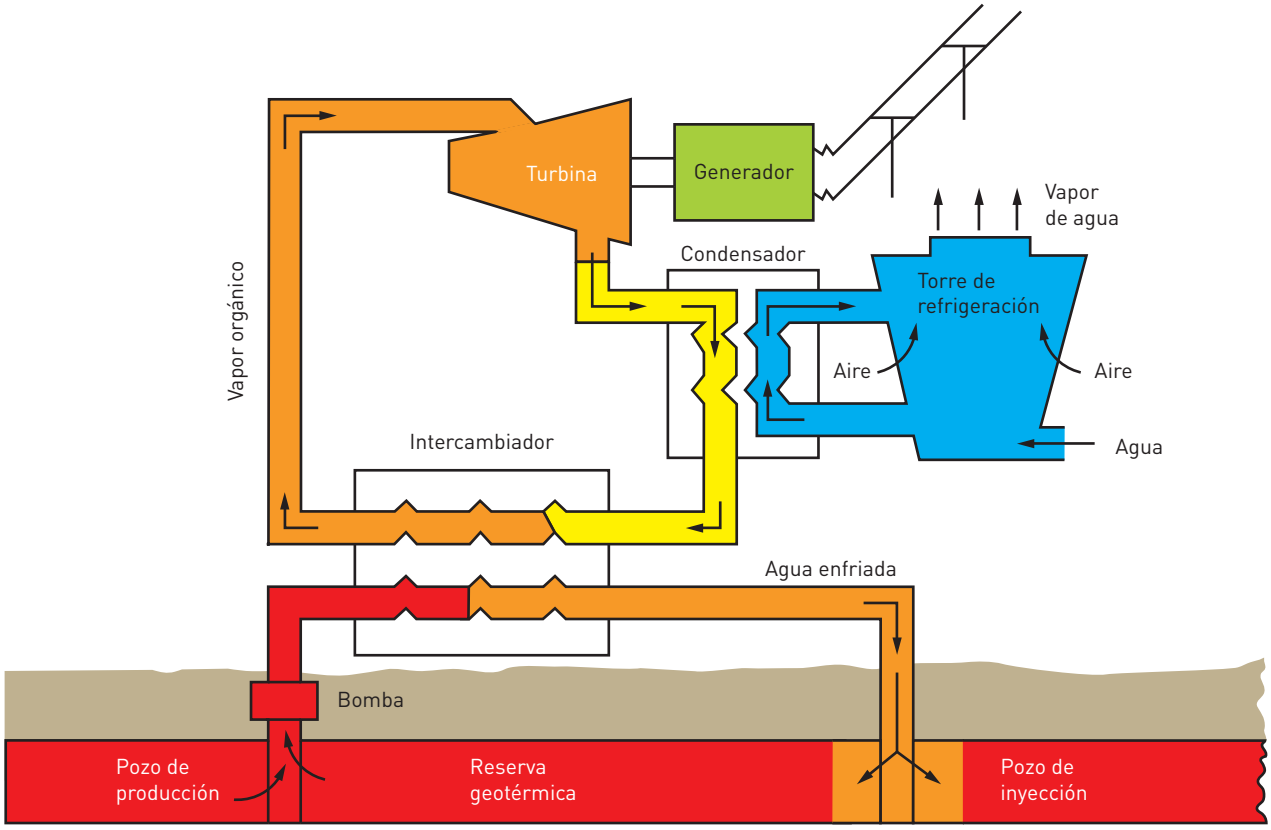
5.2.1.3 Plantas de ciclo binario

Permiten extraer energía de yacimientos de media temperatura (entre 100 y 150 ºC) y de recursos geotérmicos con elevada salinidad de forma más eficiente que las plantas flash, provocando un menor impacto ambiental al no emitir gases a la atmósfera. Se basan en evitar el uso directo del fluido termal, utilizando un fluido secundario. Cuando el fluido geotérmico tiene suficiente entalpía (> 200 kcal/kg), se puede utilizar agua como fluido secundario, pero si tiene menor entalpía (yacimientos de media temperatura), se usa como fluido secundario alguno con un comportamiento termodinámico mejor (bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a altas temperaturas). En este caso, es común el empleo de mezclas de hidrocarburos altamente volátiles como propano, n-butano, isobutano o isopentano.

Los desarrollos tecnológicos durante la década de los ochenta y noventa, han supuesto notables avances en la producción de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos de temperaturas más bajas, de modo que, en la actualidad, estas plantas pueden utilizar recursos de temperaturas de 75 ºC y recursos de temperaturas hasta 180 ºC.

A través de un intercambiador de calor, el fluido termal –que puede ser agua caliente, vapor o una mezcla de ambos– cede el calor al fluido secundario (o *de trabajo*), que se calienta y vaporiza. El vapor resultante acciona la turbina y, posteriormente, se condensa en un condensador de aire o agua y se bombea de nuevo al intercambiador, donde vuelve a vaporizarse. El fluido secundario, por tanto, se encuentra en un circuito cerrado. El esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario se recoge en la Figura 5.3.

Figura 5.3. Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario



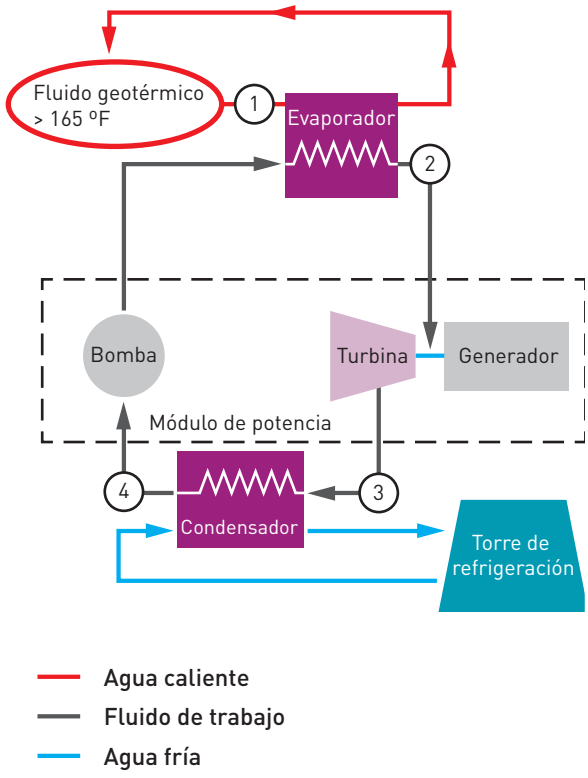
Fuente: KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology.* Geothermal Energy Association. January 2008

Los fluidos geotérmicos nunca entran en contacto con la atmósfera antes de ser bombeados de nuevo al yacimiento geotérmico. Por otra parte, el agua geotermal nunca se vaporiza en las plantas de ciclo binario con sistema de refrigeración por aire, de modo que el 100% de la misma puede reinyectarse al almacén a través de un circuito cerrado, circunstancia que, además de contribuir a reducir prácticamente a cero las ya de por sí bajas emisiones, permite mantener la presión del almacén, prolongando de este modo el tiempo de duración del proyecto.

La generación de energía eléctrica a partir de recursos de baja entalpía (hasta 180 ºC) solo es económicamente viable en plantas binarias que siguen el proceso *Orgánico Rankine* (ORC: *Organic Rankine Cycle*) o el proceso *Kalina*. El desarrollo de estos ciclos ha permitido superar las dificultades de costes y rendimientos que presentaban hace años las plantas binarias, posibilitando, incluso, el aprovechamiento de recursos procedentes de yacimientos de rocas calientes (HDR/EGS) para generar electricidad.

- **Ciclo Orgánico Rankine (ORC)**. El sistema de producción eléctrica basado en el ciclo Orgánico Rankine es un sistema de ciclo binario avanzado, completamente cerrado, basado en un simple proceso de evaporación. Las plantas eléctricas de ciclo binario que operan con este ciclo tienen un extenso campo de aplicación con recursos de temperaturas superiores a 120 ºC. También pueden utilizarse en ellas recursos de temperaturas más bajas –como sucede en la central geotérmica ORC de Simbach-Braunau (Austria), que usa salmueras a 80 ºC para producir energía eléctrica–, pero con costes más altos y eficacias más bajas en la conversión de calor a electricidad.
  Las plantas eléctricas ORC utilizan como fluido secundario uno de naturaleza orgánica (normalmente, un hidrocarburo, como propano, butano o isopentano), cuya selección depende, fundamentalmente, de la temperatura de la salmuera geotérmica. El ciclo de Rankine incluye cuatro procesos que cambian el estado del fluido secundario, en los que intervienen, como dispositivos principales, un evaporador, una turbina, una torre de refrigeración y una bomba de alimentación (ver Figura 5.4). Ejemplos de aplicaciones en proyectos geotérmicos son las centrales eléctricas de Landau (Alemania) y Soultz-sous-Forêts (Francia). La eficiencia en la conversión de energía bruta de una central eléctrica ORC es función de la temperatura inicial de la salmuera geotérmica, aumentando desde un 5,5% a 80 ºC hasta un 12% a una temperatura de 180 ºC.
  El principal inconveniente del ciclo Orgánico Rankine es su limitada capacidad de adaptación a posibles cambios en las variables que condicionan el proceso. Parámetros de control como la temperatura, a veces solo se conocen cuando finaliza la perforación y se completa la fase de pruebas, dificultando el diseño previo de las plantas geotérmicas.
  No obstante, el proceso ORC constituye una tecnología probada y fiable. El principal proveedor de plantas de este tipo, la compañía *Ormat Systems Ltd.*, ha comprobado su éxito con una potencia instalada de 1.200 MW en yacimientos de baja y alta entalpía de todo el mundo (Legmann 2009).

Figura 5.4. Esquema del ciclo Orgánico Rankine



Fuente: http://thefraserdomain.typepad.com/energy/geothermal/

La compañía americana *Ormat Technologies Inc.* ha construido plantas modulares de ciclo binario Rankine, utilizando una unidad de generación eléctrica de diseño propio, comercializada como **Ormat® Energy Converter** (OEC). La potencia de las unidades producidas varía desde 250 kW

hasta 130 MW. Las OEC están diseñadas para instalaciones al aire libre que trabajan con una amplia variedad de fuentes de calor, incluidos los recursos de baja temperatura. Cabe citar como ejemplo una de las unidades pequeñas de *Ormat* instalada en Tailandia, que utiliza fluidos geotérmicos a unos 49 ºC. Los componentes principales de una unidad OEC son un vaporizador/precalentador, un turbogenerador, un condensador con sistema de enfriamiento por aire o por agua, una bomba de alimentación y dispositivos de control. Se trata de un producto comercial suficientemente desarrollado, probado en campo, utilizado en 71 países de todo el mundo.

- **Ciclo Kalina.** Utiliza un fluido secundario con, al menos, dos componentes químicos (normalmente amoníaco y agua, actuando esta última como disolvente). La proporción de los componentes varía para permitir el cambio de fase a unas determinadas condiciones de presión y temperatura. Esto supone una mayor adaptabilidad a variaciones de temperatura de la salmuera geotérmica.
  De modo similar a como sucede en el ciclo Orgánico Rankine, la energía térmica se transmite a un fluido secundario. Como consecuencia de los diferentes puntos de ebullición, se genera un vapor rico en amoníaco y un agua pobre en este compuesto.
  La eficiencia en la conversión de energía bruta de una central eléctrica de ciclo Kalina depende, igualmente, de la temperatura inicial de la salmuera geotérmica, aumentando desde el 8,5% a 80 ºC hasta el 12% a una temperatura de 160 ºC, superando, de este modo, la eficiencia de las plantas ORC, especialmente a bajas temperaturas. Este hecho, junto a su mayor flexibilidad, constituye la principal ventaja de la tecnología Kalina, relativamente reciente, frente a la tecnología ORC.
  Ejemplos de aplicaciones geotérmicas de la tecnología Kalina son las centrales eléctricas de Husavik, en Islandia, y Unterhaching, en Alemania.

5.2.1.4 Plantas de ciclo combinado

Con el fin de aprovechar los beneficios de las tecnologías binaria y flash, se ha utilizado una combinación de ambas, conocida como *ciclo combinado flash-binario*, de la que fue pionera la compañía *Ormat Technologies, Inc*. El sistema flash-binario alcanza su máxima eficacia en yacimientos con vapor a alta presión.

En las plantas de ciclo combinado, el vapor separado mediante un proceso flash se aprovecha en una turbina para generar electricidad, mientras que el vapor que sale de dicha turbina a baja presión se condensa en un sistema binario. De este modo, se hace un uso eficaz de las torres de refrigeración por aire en aplicaciones flash y se aprovechan las ventajas del proceso binario. Este sistema funciona en la instalación *Puna Geo Venture*, en Hawai, desde 1991.

Para sistemas de alta entalpía de agua dominante, la configuración más eficaz supone la integración en una sola planta de un ciclo combinado para vapor y una unidad binaria convencional para la salmuera separada. En este caso, cada unidad funciona con controles ordinarios, recolección de fluidos y sistemas de inyección. En las plantas de ciclo combinado es necesario un control estricto de la temperatura del agua de inyección, ya que un descenso de la misma podría suponer un recorte de producción.

5.2.2 Otras tecnologías para la producción de electricidad

Los tipos de plantas descritos representan tecnologías de conversión de energía geotérmica en electricidad que pueden catalogarse como convencionales. Ante la existencia de un importante recurso de base aún sin explotar, se han considerado –o están surgiendo– otras aplicaciones tecnológicas diferentes –algunas ya demostradas con éxito y usadas comercialmente– que podrían ampliar el potencial geotérmico disponible. Algunas de ellas son las que se describen a continuación.

5.2.2.1 Sistemas geotérmicos híbridos

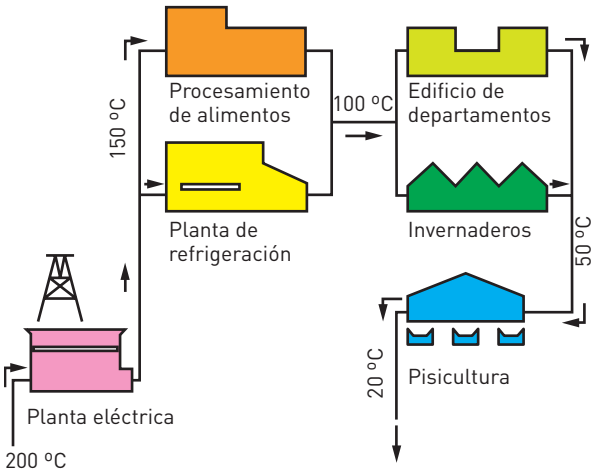
Los sistemas híbridos integran otro tipo de recurso en una central eléctrica geotérmica, por lo que pueden generar más electricidad sin incrementar el uso del recurso geotérmico, aumentando así la eficacia. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de determinar la temperatura óptima del vapor independientemente de la que presente la fuente geotérmica. El recurso geotérmico puede combinarse con otra fuente de energía de cualquier origen, incluyendo biomasa, carbón o energía hidroeléctrica.

- **Biomasa**. La compañía *Infinifuel Biodiesel* ha construido una instalación para la fabricación de

biodiesel en una pequeña planta geotérmica, en Wabuska (Nevada). Dicha instalación es prácticamente autónoma, debido, principalmente, al calor que le suministra la planta geotérmica. Ésta, que utiliza agua a 104 ºC, genera la electricidad necesaria para el funcionamiento de la planta de biodiesel y vende la producción restante.

- **Uso combinado de calor y electricidad (utilización en cascada)**. En ciertas localizaciones y bajo determinadas circunstancias, los recursos geotérmicos pueden utilizarse para producir electricidad y también para usos directos. Este modelo híbrido, conocido como *uso combinado de calor y electricidad* (CHP: *Combined Heat and Power*) o *producción en cascada*, aprovecha el calor residual producido por las plantas eléctricas –la energía disponible tras haber empleado los recursos geotérmicos en la generación de electricidad–, utilizándolo para otros fines. La cascada de *agua* procedente de una central geotérmica proporciona energía para proyectos de usos directos, como redes de climatización de distrito, invernaderos, piscicultura, aplicaciones industriales y balneoterapia (ver Figura 5.5). De este modo, se incrementa, de forma natural, la eficiencia energética total del sistema.

Figura 5.5. Diagrama CHP



Fuente: IDAE-IGME. Manual de geotermia. Junio 2008

Como puede apreciarse en la figura, tras la producción eléctrica, el fluido aún caliente puede utilizarse para la calefacción de viviendas. Tras este segundo uso, puede aprovecharse para otros usos con menores requerimientos de temperatura, como calefacción de invernaderos, piscicultura, etc.

Como ejemplos de la utilización combinada de la electricidad geotérmica y de los usos térmicos directos pueden citarse las plantas de Neustadt-Glewe y Unterhanching, en Alemania, además del caso del Blue Lagoon, una de las principales atracciones turísticas de Islandia. En este lugar, el agua geotérmica procedente de una central eléctrica se canaliza directamente a una gran masa de agua, el Blue Lagoon. Se dice que el agua tiene propiedades curativas debido a su contenido único de minerales, sílice y algas azules.

- **Energía solar.**- Según el estudio realizado en 1979 por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), se consideraba híbrido un sistema en el que se presurizaba el fluido geotérmico en cabeza de pozo y se aplicaba energía solar antes del proceso flash. Su conclusión fue que, mientras un sistema híbrido geotérmico-solar era más eficaz que una planta solo geotérmica, los híbridos no ofrecían ventajas económicas frente a los sistemas únicos. Tal conclusión se ha rebatido posteriormente, al señalarse que los híbridos del tipo indicado pueden ser más rentables que las instalaciones únicamente solares.
  La energía solar también se ha propuesto como medio para reducir los riesgos asociados a la producción con energía geotérmica, ya que en las instalaciones híbridas proporciona un calor adicional que permite mantener la capacidad productiva del yacimiento geotérmico. No obstante, aunque durante 2007 se ha discutido ampliamente sobre este tipo de plantas híbridas, no se ha publicado nada sobre su diseño y sus aspectos económicos, y tampoco se ha anunciado formalmente ningún proyecto al respecto.
  Se ha propuesto una nueva idea, aunque no se ha comercializado, que supone el uso de energía solar y energía geotérmica para recuperar petróleo de yacimientos agotados de petróleo y gas (SAGE: *Solar Augmented Geothermal Energy*).
- **Recursos geopresurizados**. Un sistema híbrido que parece tener futuro es el conocido como *sistema geopresurizado*, que combina el recurso geotérmico con un combustible fósil (gas natural). Los recursos geotérmicos geopresurizados no se han explotado desde que hace casi dos décadas se demostró su existencia, coincidiendo con un período de bajos precios del petróleo y el gas. El actual incremento de los precios de estos combustibles parece abrir nuevos horizontes para los recursos citados.
  Uno de los proyectos para demostrar la existencia de recursos geopresurizados fue el realizado por

el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) en los años ochenta, en Pleasant Bayou (Texas). El objetivo inicial, según consta en el documento elaborado por el DOE, era aprovechar tres formas de energía: el calor del recurso geotermal (energía geotérmica), la energía del gas natural del almacén (energía química) y la presión en cabeza de pozo (energía mecánica). Debido a consideraciones económicas, en la planta de demostración de Pleasant Bayou sólo se recuperaron la energía termal y la química. El calor generado por la combustión *in situ* del gas natural se recuperó para mejorar la eficacia del ciclo.

5.2.2.2 Sistemas geotérmicos estimulados (EGS)

Estos sistemas constituyen el objeto de la investigación geotérmica centrada en la localización de estructuras favorables para el desarrollo de yacimientos geotérmicos de alta temperatura, aprovechables para la producción de electricidad pese a su muy baja permeabilidad e, incluso, carencia de fluido almacenado. Se han realizado investigaciones en diversas localizaciones de todo el mundo y se ha demostrado la viabilidad técnica de obtener calor a partir de rocas con alta temperatura y reducido contenido de agua. Sin embargo, los costes de tal recuperación determinan que actualmente no sean, todavía, competitivos económicamente.

Los recursos EGS son similares a los recursos hidrotermales tradicionales, salvo que reúnen alguna o todas las características siguientes:

- Un almacén de roca densa que el líquido no puede atravesar fácilmente porque no tiene la porosidad y permeabilidad habitualmente necesarias.
- Cantidades insuficientes de vapor y/o agua caliente.
- Mayor profundidad que las habituales profundidades de perforación.

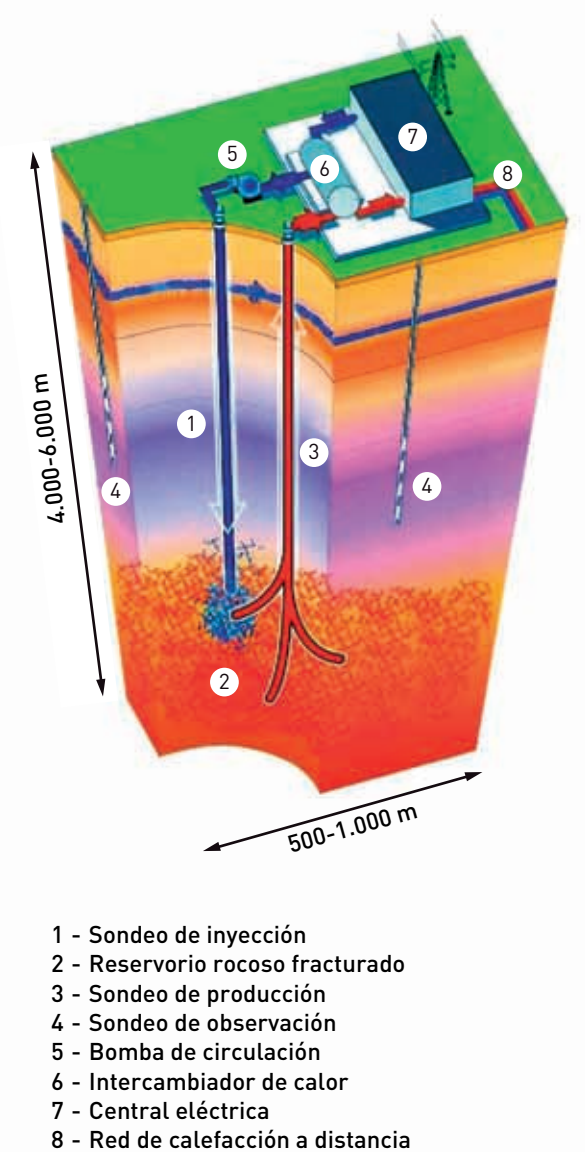
Para rocas completamente impermeables, la tecnología de recuperación del calor que almacenan se denomina, como ya se ha señalado anteriormente, *Roca Seca Caliente* (HDR) para hacer hincapié en el hecho de que estos potenciales recursos geotérmicos son secos o demasiado impermeables para transmitir a ratios útiles el agua contenida en ellos. La permeabilidad necesaria puede ser –y ha sido– creada mediante procedimientos derivados de la adaptación de métodos utilizados en la industria petrolera para mejorar la recuperación de petróleo y gas.

El primer experimento de HDR fue el que llevó a cabo *Los Alamos National Laboratory*, en Fenton Hill (Nuevo México), donde se creó un pequeño almacén hidrotermal bombeando agua a través de una perforación, a una presión lo suficientemente elevada para fracturar la roca de alrededor. Las nuevas fracturas permitían el flujo del agua a través de la roca caliente hasta un segundo pozo, cercano al primero, creándose de este modo un circuito de flujo de fluido que se mantuvo durante cerca de 20 años. Este experimento proporcionó grandes conocimientos, pero el proyecto finalizó sin demostrar la viabilidad comercial del método. Los principales problemas de este proyecto eran las altas presiones de bombeo requeridas para mantener, incluso, una escasa circulación de agua, así como la pérdida de fluido en el circuito artificial.

Se han realizado proyectos similares en Europa (Soultz-sous-Fôrets, en Francia) y Japón (Hijiori, Ogachi), que, no obstante, es más adecuado caracterizar como *Sistemas Geotérmicos Estimulados* (EGS), ya que afectan a rocas con una significativa permeabilidad inicial. Básicamente, estos proyectos buscan incrementar la productividad de yacimientos hidrotermales ya existentes, más que crear otros nuevos a partir de rocas impermeables, mejorando su permeabilidad natural lo suficiente para crear recursos geotérmicos económicamente competitivos.

En la Figura 5.6 se presenta un esquema simplificado de un aprovechamiento de roca caliente seca o sistema geotérmico estimulado.

Figura 5.6. Esquema de un sistema geotérmico estimulado



Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

Existe la posibilidad de utilizar CO_2 a presión supercrítica como fluido de transmisión de calor en almacenes EGS en lugar de agua (BROWN, 2000). Este planteamiento supone la recuperación de energía geotérmica junto con el almacenamiento simultáneo de CO_2, un gas de efecto invernadero. Los trabajos realizados para estudiar el comportamiento de este gas en las condiciones de presión y temperatura que se estiman de interés, en lo que a flujo y transferencia de calor respecta, así como para determinar sus posibles interacciones con la roca que constituye el almacén, indican que el CO_2 permitiría una mejor extracción de calor que los fluidos acuosos[5]. Asimismo, estudios geotérmicos preliminares sugieren que este compuesto puede evitar interacciones roca-fluido desfavorables que se han observado en sistemas acuosos. No obstante, para una evaluación completa del potencial de sistemas EGS con CO_2 será necesario un programa de investigación que integre el modelo desarrollado con estudios de campo y laboratorio.

La tecnología aplicada para estimular la permeabilidad en sistemas EGS incluye análisis de fallas y fracturas, fracturación hidráulica para aumentar la permeabilidad, perforación direccional para cortar fracturas con orientación favorable e inyección de aguas subterráneas y aguas residuales en localizaciones estratégicas para reponer fluidos y revertir las bajadas de presión. Asimismo, se considera la aplicación de técnicas de estimulación química –inyección de reactivos– para solucionar el problema del descenso de permeabilidad del sistema debido a la precipitación natural o inducida de sustancias minerales. La selección de un ácido o de cualquier aditivo en una situación determinada depende de las características del almacén y del propósito del tratamiento. En el caso de un tratamiento ácido, el objetivo es aumentar la porosidad y la permeabilidad de la formación.

Considerados en conjunto, los métodos indicados pueden ampliar la productividad y el período de explotación de los yacimientos geotérmicos existentes o incrementar sus dimensiones y sus producciones de salida, o aprovechar yacimientos hasta ahora no viables económicamente, al permitir el desarrollo de zonas previamente improductivas. Los programas de inyección en áreas marginales del yacimiento The Geysers (California) y Dixie Valley (Nevada) son buenos ejemplos de nuevos proyectos EGS.

Según el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), la tecnología EGS podría aprovecharse utilizando sistemas de producción eléctricos geotérmicos ya existentes, incluidas las plantas binarias, las de ciclo combinado flash-binario, las

[5]PRUES, K. *Enhanced Geothermal Systems (EGS).Comparing water and CO2 as heat transmission fluids.* Proceedings, New Zealand Geothermal Workshop 2007 - Auckland, New Zealand, November 19-21, 2007

plantas flash y las doble flash, realizando algunos ajustes en los componentes de las mismas.

Los recursos de temperaturas más altas, conocidos como *sistemas geotérmicos supercríticos*, necesitarían de los denominados *sistemas de triple expansión*, que son variaciones del sistema convencional doble-flash, con adición de un fluido denso de relleno y una turbina diseñada para soportar las muy altas presiones que probablemente van a encontrarse para los geofluidos EGS. Sin embargo, estos sistemas requerirían grandes profundidades (superiores a los 7,5 km), por lo que el desarrollo de sistemas EGS convencionales que utilizan plantas de ciclo binario o flash es más probable a corto plazo.

Teniendo en cuenta que, hasta la fecha, estos sistemas no han sido probados con éxito, los investigadores sólo pueden hacer postulados sobre las plantas que se precisarán. No obstante, hay ciertos aspectos de la tecnología EGS que podrían influir en la elección del tipo de instalación, entre los que cabe citar los siguientes:

- Fluctuaciones en el contenido de gases no condensables.
- Variaciones de temperatura de la fuente de calor.
- Variaciones de flujo del recurso.
- Dimensiones de la planta eléctrica.

5.2.2.3 Coproducción con petróleo y gas

Un sistema de coproducción en un yacimiento petrolífero aprovecha los pozos ya perforados en los desarrollos petroleros y gasistas. Estos pozos son, además, lo suficientemente profundos como para encontrar agua caliente e, incluso, podría aumentarse su profundidad en zonas calientes.

Para la industria petrolera, producir agua caliente –como sucede en ciertos yacimientos inundados de la Costa del Golfo (EEUU), donde el 95% de la producción en los pozos de petróleo y gas es agua– supone, en el mejor de los casos, un inconveniente: es difícil de manejar, su bombeo tiene un coste económico y hay que reinyectarla, lo que implica un coste añadido. La captura de este agua caliente y su envío a una central de ciclo binario ofrece la posibilidad de una fuente de ingresos adicional. Hay que tener en cuenta que el agua recuperada puede incorporase sin problemas al ciclo binario de una planta geotérmica en funcionamiento, ya que la mayoría del fluido producido en un pozo de gas y petróleo ya ha pasado por una instalación donde se separan los hidrocarburos y se elimina el agua. Además, esta aplicación resulta económicamente favorable, incluso a pequeña escala, ya que, al aprovechar pozos ya perforados y conocerse la existencia del recurso, se eliminan costes previos.

5.2.3 Tecnologías para usos directos del calor

La utilización directa o inmediata de la energía geotérmica incluye una amplia variedad de usos que abarcan piscinas climatizadas y balneoterapia, calefacción y refrigeración –incluidos los sistemas energéticos de distrito–, producción de agua caliente sanitaria (ACS), acuicultura y aplicaciones agrícolas (invernaderos y calentamiento de suelos) e industriales (extracción de minerales y secado de alimentos y maderas). El uso del calor geotérmico en aplicaciones distintas de la generación de electricidad se ha realizado, tradicionalmente, a pequeña escala, pero los continuos avances tecnológicos han permitido su aprovechamiento en proyectos urbanos e industriales de gran envergadura.

Las temperaturas de trabajo favorables para el aprovechamiento directo del calor geotérmico incluyen un rango muy amplio entre 30 y 150 ºC, rango al que corresponden los recursos geotérmicos de baja y media entalpía, habitualmente localizados a profundidades entre 1.500 y 3.500 m, y los someros o de muy baja entalpía, incluidos los acuíferos convencionales con aguas a temperaturas de 15-20 ºC.

5.2.3.1 Tecnologías existentes en geotermia somera

Dada su estabilidad térmica frente a los cambios estacionales, el subsuelo, en sus primeros 100-200 m, resulta un medio adecuado para proporcionar y almacenar energía térmica. De hecho, a 10-20 m de profundidad, su temperatura se mantiene prácticamente constante, incrementándose según el gradiente geotérmico al aumentar la profundidad (3 ºC cada 100 m). Las tecnologías para aprovechar esta energía almacenada en los primeros metros de la corteza terrestre son básicamente dos:

- *Bomba de calor geotérmica*, o bomba para calor de fuente terrestre (GHP: Geothermal Heat Pump).
- *Almacenamiento subterráneo de energía térmica* (UTES: Underground Thermal Energy Storage).

En ambos casos, las tecnologías desarrolladas para aprovechar el calor del subsuelo son función de la accesibilidad del recurso geotérmico, y pueden clasificarse en dos tipologías principales que, a su vez, incluyen diferentes subtipos:

- *Circuitos abiertos*, basados en el uso de aguas subterráneas, que suponen la captación de agua de un acuífero para su aprovechamiento. En este caso, el agua subterránea es el medio de transporte del calor.
- *Circuitos cerrados*, cuyo fundamento es el empleo de un fluido –básicamente, agua con algún aditivo–, para extraer el calor de los materiales existentes a poca profundidad en el subsuelo. Implican la instalación de un intercambiador en el terreno para el aprovechamiento energético, cuya pared separa el fluido termoportador de la roca y del agua subterránea.

Habría que considerar una tercera categoría, a la que pertenecen los sistemas que no pueden incluirse, estrictamente, en ninguna de las dos indicadas. Serían aquéllos en los que existe cierta diferenciación entre el agua subterránea y el fluido termoportador, pero no hay ninguna barrera entre ellos, como es el caso de los que aprovechan las temperaturas de las aguas de minas o de obras subterráneas (túneles, etc.), con caudales suficientes para su explotación con fines energéticos.

a) Bomba de calor geotérmica

La bomba de calor geotérmica extrae calor del subsuelo a una temperatura relativamente baja, aumentándola, mediante el consumo de energía eléctrica[6], para posibilitar su uso posterior en sistemas de calefacción. Existe la opción de invertir el proceso en verano, inyectando en la tierra el calor absorbido en la refrigeración de la instalación a climatizar. Esta tecnología representa, en la mayoría de los casos, la única posibilidad de aprovechamiento de los recursos de muy baja entalpía (T < 30 ºC), asociados a la denominada *geotermia somera* y presentes bajo cualquier terreno en cualquier lugar del Planeta, que son los que mejor se adaptan a las necesidades de climatización de edificios.

La bomba de calor puede transferir el calor desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (*foco frío*) hacia las dependencias interiores que se pretenden calefactar, o para emplearlo en procesos que precisan calor en la edificación o en la industria. Asimismo, ofrece la posibilidad de aprovechar los calores residuales de procesos industriales como foco frío, circunstancia que permite disponer de una fuente a temperatura conocida y constante que mejora el rendimiento del sistema.

Las bombas de calor geotérmicas funcionan del mismo modo que las bombas de calor convencionales (aire-aire y aire-agua), de manera que pueden calentar, refrigerar y, si están adecuadamente equipadas, proporcionar agua caliente sanitaria, pero con mayor eficacia que éstas. Según el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), las GHP utilizan entre un 25% y un 50% menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, reduciendo el consumo energético –y las emisiones correspondientes– de un 45% a un 70%, si se comparan con éstos.

Como ya se indicó anteriormente, los sistemas que conectan la bomba de calor geotérmica con el subsuelo y permiten la extracción del calor del terreno o su inyección en él son, básicamente, abiertos o cerrados, si bien existen otros tipos que también serán objeto de consideración en el presente documento. Para seleccionar el sistema más adecuado para una instalación determinada, deben considerarse los siguientes aspectos: geología e hidrogeología del terreno, dimensiones y uso de la superficie disponible, existencia de fuentes potenciales de calor y características de los edificios, en lo que a calefacción y refrigeración respecta. El objetivo es diseñar un sistema que permita obtener un óptimo rendimiento con los mínimos costes posibles.

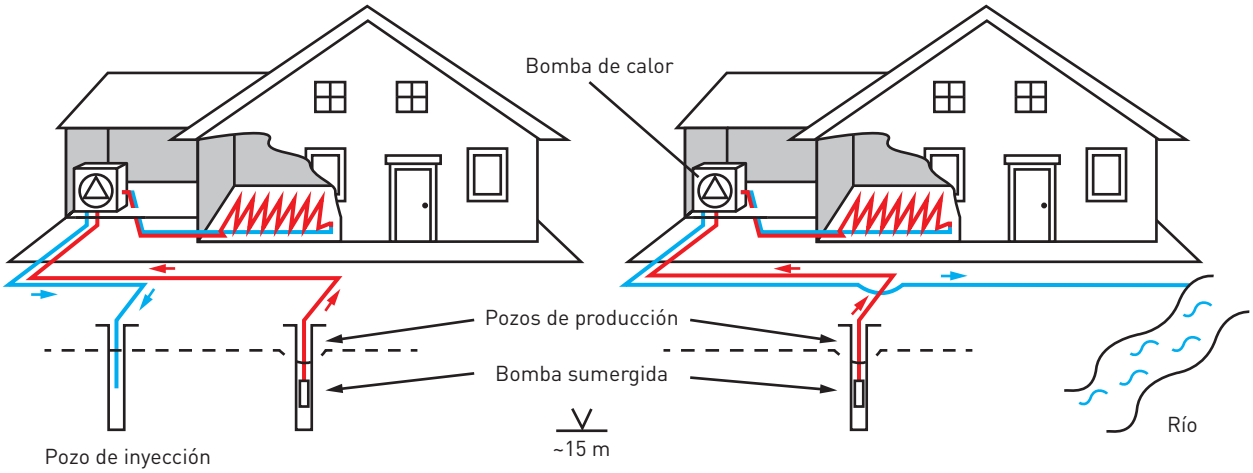
SISTEMAS ABIERTOS. Se caracterizan porque el portador del calor –el agua subterránea– fluye libremente en el subsuelo y actúa, además de como fuente de calor, como medio para el intercambio del mismo. El principal aspecto técnico de este tipo de sistemas es el relativo a los sondeos perforados para explotar la capa freática o los recursos de acuíferos poco profundos situados por debajo de ésta. En la mayoría de los casos, son necesarios dos sondeos –explotación mediante *doblete* de sondeos–, uno para extraer el agua subterránea y otro para reinyectarla en el mismo acuífero de la que se obtuvo.

[6]El consumo de electricidad de la bomba de calor geotérmica se cifra en 0,25-0,30 kWh por cada kWh de calefacción producido (MANDS, E.; SANNER, B. Shallow Geothermal Energy. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar)

El sondeo de captación, equipado con una bomba sumergible, conduce el agua subterránea hasta la bomba de calor, desde donde, una vez enfriada tras extraer su energía, se devuelve al acuífero de origen o se vierte a un cauce superficial (Figura 5.7). Con el fin de evitar el enfriamiento continuo del agua subterránea, los sondeos de producción e inyección deben situarse, respectivamente, aguas arriba y aguas abajo del flujo subterráneo, y a la distancia adecuada, de acuerdo con los modelos de transmisión de calor.

Para la aplicación de estos sistemas se requiere una permeabilidad suficientemente elevada del terreno, que permita obtener la cantidad necesaria de agua subterránea a poca profundidad, y una cierta calidad de esta última, circunstancia que supone el control de ciertos parámetros, como el contenido de hierro y el potencial redox, para evitar problemas de corrosión, precipitación y obstrucción de conducciones, que, a largo plazo, podrían afectar al funcionamiento de la instalación.

Figura 5.7. Diagramas de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua (sistema abierto)



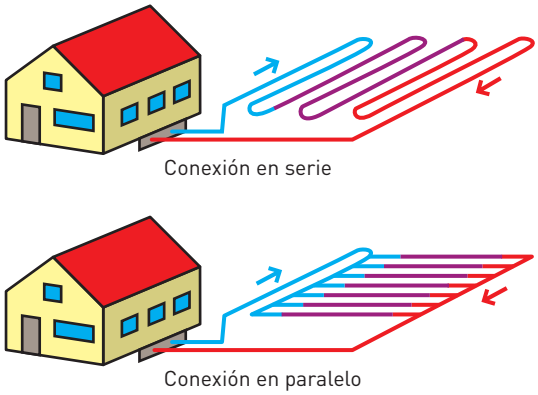
Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

Estos sistemas, bastante difundidos en España –sobre todo en zonas con acuíferos aluviales con buenas productividades y piezometrías someras–, son sencillos, con bajos costes de inversión y elevados rendimientos, aunque con el inconveniente de que su explotación está sujeta a una tramitación administrativa compleja y dilatada.

SISTEMAS CERRADOS. Se basan en el empleo de intercambiadores enterrados, con un fluido termoportador en su interior que cede la energía del subsuelo a la bomba y viceversa. Por tanto, es el fluido que circula por el intercambiador en circuito cerrado el que se lleva a la bomba de calor y no el agua subterránea, como sucedía en el caso de los sistemas abiertos. Los sistemas cerrados ofrecen la posibilidad de aprovechar el calor acumulado en los materiales de los niveles más externos de la corteza terrestre, en las situaciones en que la impermeabilidad del terreno o la profundidad de los niveles no permite explotar la energía de las aguas del subsuelo. Son de dos tipos, horizontales y verticales, en función de cómo se sitúen los intercambiadores en el terreno.

- **Horizontales**. Los circuitos cerrados con intercambiador de calor horizontal son los sistemas cerrados más fáciles de instalar, si bien, en ocasiones, están sujetos a limitaciones de espacio. Por este motivo, en el centro y el oeste de Europa, las tuberías se disponen siguiendo un diseño relativamente denso, conectándose en serie o en paralelo (Figura 5.8).

Figura 5.8. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Shallow Geothermal Energy. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

En estas distribuciones con alta densidad de tuberías, lo habitual es retirar completamente la capa superficial del terreno, colocar las conducciones y, finalmente, cubrirlas con la tierra retirada. En el norte de Europa y de América, donde el terreno es más barato, se prefiere un circuito más amplio, con tuberías situadas en zanjas (Figura 5.9).

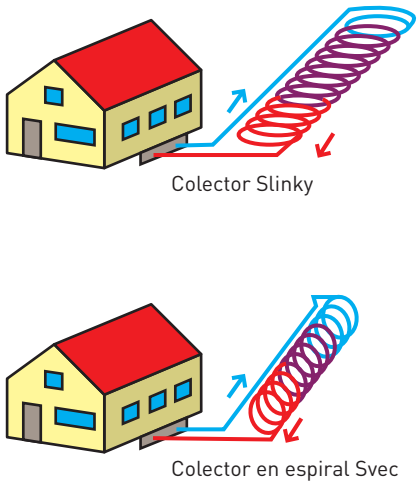
Figura 5.9. Sistema cerrado con intercambiador de calor horizontal de un bucle

Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

Las tuberías, normalmente de polietileno, de 25 a 40 mm de diámetro, por las que circula el líquido de intercambio térmico –agua o agua glicolada– se instalan en zanjas a una profundidad mínima de 0,90 metros, en disposiciones que incluyen hasta seis tubos por zanja, si bien lo habitual es que sólo se coloquen dos.

Para solventar los problemas de espacio que se plantean con este tipo de colectores, se han desarrollado unos intercambiadores de calor especiales para ubicar en el terreno, que resultan ser los más adecuados para sistemas que trabajan con bombas de calor para usos en calefacción y refrigeración. Un tipo de estos intercambiadores, conocido como *slinky*, se basa en la colocación de bobinas de polietileno en el terreno, extendiendo las sucesivas espiras e intercalando tierra seleccionada o arena (Figura 5.10). Dichas espiras pueden disponerse horizontalmente, en una zanja ancha, o verticalmente, en una zanja estrecha.

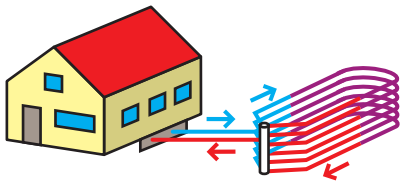
Figura 5.10. Sistemas cerrados con intercambiadores de calor de tipo bobina



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Shallow Geothermal Energy. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

Estos colectores son ampliamente utilizados en EEUU pero sólo uno de sus tipos, el colector en zanja (*trench collector*), ha alcanzado cierta distribución en Europa, sobre todo en Austria y el Sur de Alemania. En este caso, varias tuberías de pequeño diámetro se sujetan a las paredes bastante inclinadas de una zanja, a varios metros de profundidad (Figura 5.11).

Figura 5.11. Sistema cerrado con colector en zanja



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

La radiación solar, al incidir sobre la superficie terrestre, constituye el principal medio de recarga térmica de estos sistemas, por lo que es importante no cubrir la superficie situada por encima de las tuberías situadas en el terreno.

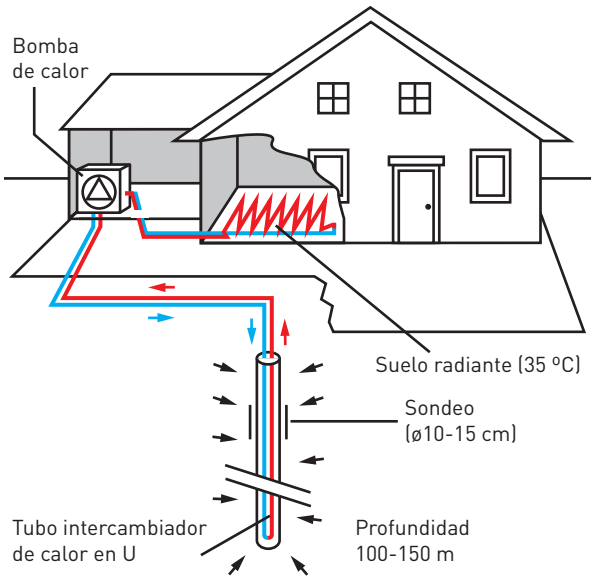
Normalmente, estos sistemas tienen un coste inferior al que supone la perforación de sondeos, pero presentan el inconveniente de requerir una

considerable superficie con espesores ripables superiores a 1 metro, lo que no siempre es fácil de conseguir, además de estar sometidos a importantes variaciones de temperatura y humedad, que afectan al rendimiento estacional.

Una variante de los sistemas cerrados con intercambiador horizontal son los denominados **sistemas de expansión directa**, en los que el intercambio térmico se realiza mediante la circulación del fluido refrigerante –el medio de trabajo de la bomba de calor– directamente por el circuito situado en el terreno. La ventaja de esta tecnología, limitada a las unidades más pequeñas, es que evita uno de los procesos de intercambio de calor, ofreciendo, de este modo, la posibilidad de mejorar la eficacia del sistema. En Francia y Austria, la expansión directa también se ha combinado con la condensación directa en los sistemas de calefacción de suelos.

- **Verticales**. Los sistemas cerrados con intercambiador vertical suponen la perforación de sondeos de profundidad variable –normalmente, entre 60 y 200 metros– y pequeño diámetro –de 10 a 15 cm–, en los que se introducen colectores de calor –un doble tubo en el caso más sencillo– por los que circula el fluido. Estos dispositivos verticales de captación de calor se denominan **sondas geotérmicas** (Figura 5.12).

Figura 5.12. Sonda geotérmica



Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

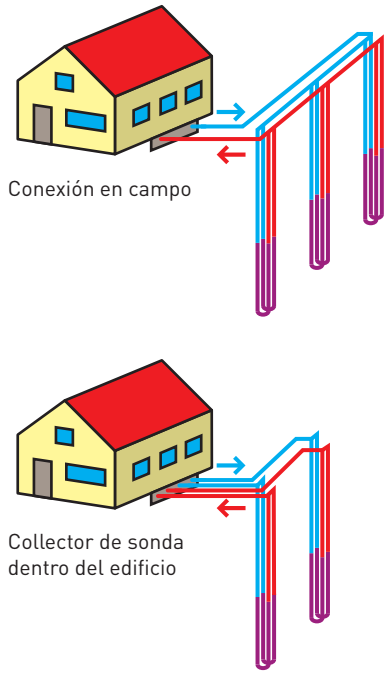
Los tubos captadores se introducen en los sondeos tras finalizar la perforación. Habitualmente, se instalan tuberías de polietileno o polipropileno, cuyo diámetro varía entre 3/4" (25 mm) y 2" (63 mm), en función del caudal circulante y la longitud del circuito.

La fuente de recarga de la energía térmica captada por los intercambiadores verticales es, en la zona superficial, la radiación solar y, en la zona inferior, el flujo de calor geotérmico, con cierta influencia del agua subterránea circulante –poco importante en la mayoría de los casos– o de las aguas percoladas. Durante el funcionamiento de la bomba de calor geotérmica, se registra un descenso de la temperatura del terreno en torno al sondeo, al que hay que unir el derivado de la denominada resistencia térmica del propio sondeo, del que son responsables el material de relleno del mismo y las paredes del intercambiador. Para reducir las pérdidas de temperatura en los sondeos, éstos deben rellenarse con algún material que permita la transmisión de calor a los tubos captadores situados en su interior, además de la circulación del agua que pudiera haber en el terreno debido a la existencia de algún nivel freático a poca profundidad o a la presencia de aguas someras procedentes de filtraciones pluviométricas. Teniendo en cuenta que la presencia de agua en el terreno aumenta considerablemente la capacidad para transmitir el calor geotérmico, en el caso de que en el sondeo no la haya, lo más recomendable es un relleno de gravas o arenas permeables para incrementar la conductividad térmica. También es adecuado el relleno con materiales térmicamente mejorados, desarrollados para disminuir las referidas pérdidas.

Para el diseño de una sonda geotérmica, se requiere el conocimiento previo de la conductividad térmica del terreno, la humedad natural del suelo, la presencia o no de aguas subterráneas y el tipo de prestaciones de la instalación prevista. Además, resulta clave la potencia de extracción de calor por metro lineal de sonda. En los casos en que se precisan potencias mayores a las habituales –entre 20 y 70 W/m–, pueden emplearse **campos de sondas geotérmicas**, en número de 4 a 50, con profundidades que oscilan entre 50 y 200 metros, dependiendo de la potencia requerida y de las condiciones geológicas locales. Los colectores de las sondas pueden disponerse junto a las edificaciones o debajo de ellas, o bien, las tuberías pueden conectarse en zanjas en el

terreno (Figura 5.13). Los campos de sondas geotérmicas pueden constituir una base adecuada para los sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica, que se tratarán más adelante.

Figura 5.13. Intercambiadores verticales en sondeos (sondas geotérmicas)



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

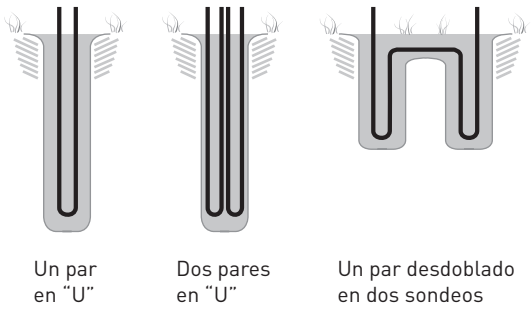
Las instalaciones que disponen de bomba de calor acoplada a circuitos cerrados con intercambiadores verticales son de dimensiones muy variadas: desde viviendas unifamiliares con un solo intercambiador hasta grandes edificios que requieren campos con un importante número de sondas geotérmicas. Una de las instalaciones con mayor número de intercambiadores verticales instalados en Europa para dar servicio a un único edificio corresponde a las oficinas centrales de Control del Tráfico Aéreo Alemán (*Deutsche Flugsicherung*): un total de 154 perforaciones de 70 m de profundidad.

Para el diseño de intercambiadores verticales conectados a instalaciones individuales o de pequeño tamaño puede recurrirse a tablas, datos empíricos y normas generales (los hay en Suiza y Alemania), mientras que, en el caso de instalaciones de mayor envergadura, es necesario calcular el número y la longitud de los dispositivos necesarios (existen programas para PC en Europa y EEUU que permiten realizar estos cálculos; en casos complicados, pueden hacerse simulaciones con modelos numéricos). Para un número considerable de instalaciones de pequeña envergadura –el caso, por ejemplo, de una comunidad formada por 60 viviendas unifamiliares con dos sondas geotérmicas para cada una de ellas–, cuanto menor sea la distancia entre perforaciones, mayor deberá ser la profundidad de los intercambiadores.

Los tubos captadores pueden instalarse de diversas maneras en el interior del sondeo, pudiendo considerarse dos tipos básicos de intercambiadores verticales:

- **Con tubos en U**. El sistema de captación consiste en un par de tubos unidos en su base mediante un codo de 180 º, cuyas salidas se conectan al circuito primario de las bombas de calor geotérmicas. En cada sondeo pueden instalarse, dependiendo de su diámetro de perforación, hasta cuatro de estos pares de tubos en U, existiendo también la posibilidad de dar a estos pares un mayor recorrido a lo largo de varias sondas (Figura 5.14). La ventaja de esta configuración es el bajo coste del material de los tubos, circunstancia que ha contribuido a que los intercambiadores verticales de este tipo sean los más utilizados en Europa.

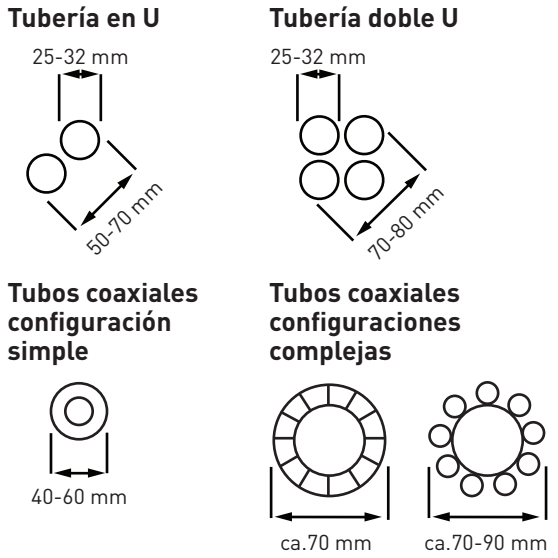
Figura 5.14. Tipos de instalación de tubos captadores verticales en sondas geotérmicas



Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

- **Con tubos coaxiales**. El sistema de captación, en su disposición más simple, consta de dos tubos concéntricos de diferente diámetro. Existen configuraciones más complejas que incluyen un mayor número de tubos colectores.

Figura 5.15. Secciones de diferentes tipos de intercambiadores verticales

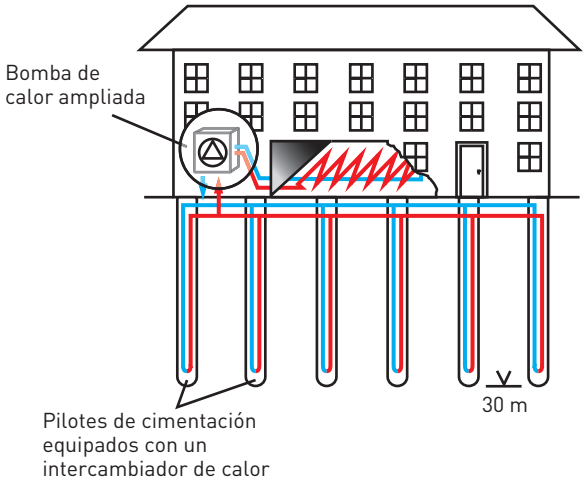


Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

La estabilidad de la temperatura en los primeros metros del subsuelo, hecho ya señalado con anterioridad, permite el aprovechamiento de la energía térmica transmitida desde el interior de la Tierra hasta las capas más superficiales de la corteza terrestre, mediante los captadores ubicados en las perforaciones. Esta circunstancia y el bajo índice de ocupación del terreno que presenta este sistema se muestran como las principales ventajas del mismo. Su principal inconveniente son los costes iniciales de implantación.

Una variante de este sistema son las **cimentaciones energéticas**, que aprovechan las estructuras de cimentación profunda de los edificios para captar y disipar la energía térmica del terreno. En este caso, los propios pilotes de la cimentación –piezas de hormigón armado– actúan como sondas geotérmicas, convirtiendo a la estructura en un campo de ellas (Figura 5.16). Los pilotes utilizados pueden ser prefabricados o montados *in situ*, con diámetros que varían entre 40 cm y más de 1 m.

Figura 5.16. Sistema de cimentaciones energéticas

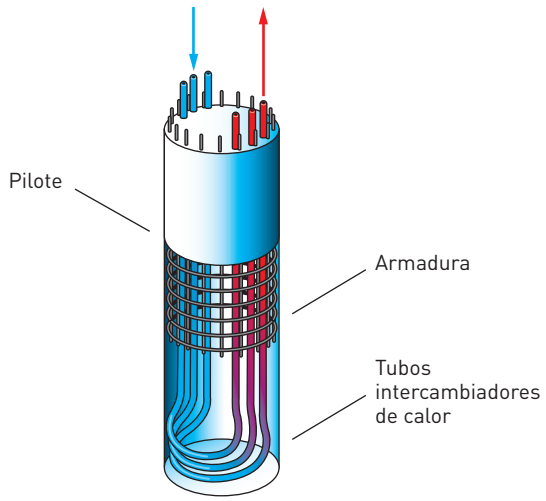


Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

En estos sistemas, también denominados *cimientos geotérmicos, energéticos o termoactivos, geoestructuras o pilotes intercambiadores de calor*, se inserta, en la totalidad o en una parte de los pilotes, una red de tubos de polietileno, propileno o PVC, que se conforman como conductos en U y por los que se hace circular agua con un anticongelante, que se conectan en circuito cerrado a una bomba de calor o una máquina de refrigeración. En cada pilote, sujetos a la armadura metálica de éste, pueden situarse varios pares de tubos independientes (Figura 5.17), que convergen en superficie en un colector común. Una vez colocada la armadura del pilote en la excavación, éste se rellena con hormigón, de forma maciza o dejando el centro hueco.

La red de tubos intercambiadores constituyen la alimentación a la bomba de calor geotérmica –una o varias, en función de las necesidades del edificio al que se va a dar servicio–, conformando la instalación de climatización e, incluso, de agua caliente sanitaria.

Figura 5.17. Tubos intercambiadores de calor integrados en un pilote para cementación



Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

Para implantar una instalación geotérmica de estas características, es preciso el conocimiento previo de diversos factores, entre los que cabe citar las características del terreno que definen su potencial geotérmico y la velocidad de flujo de la capa freática, de la que depende, directamente, la capacidad de un conjunto de pilotes intercambiadores para almacenar energía térmica estacionalmente[7].

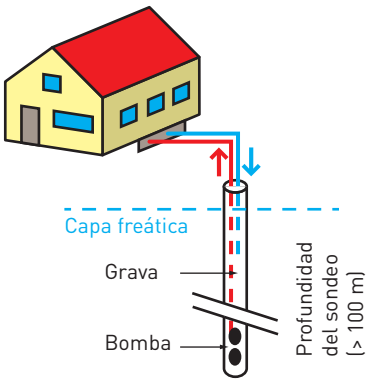
Esta tecnología, que hace años solo se utilizaba en viviendas individuales y plurifamiliares, es, en la actualidad, una de las más empleadas para calentar y refrigerar edificios de grandes dimensiones. Ofrece, como ventajas, un considerable ahorro de trabajo, al desarrollarse de forma conjunta los proyectos de climatización y de construcción, y de espacio, al situarse todo el circuito de intercambio debajo del edificio a climatizar. Su principal inconveniente es la dificultad –prácticamente, imposibilidad– que presenta la reparación de los tubos captadores una vez instalado y hormigonado el pilote. Por este motivo, lo habitual es sobredimensionar el número de pares de tubos captadores para, en caso de que alguno quede inutilizado, contar con el mínimo necesario para garantizar el suministro de calor a las bombas geotérmicas.

También es posible embutir tubos captadores que alimenten bombas de calor geotérmicas en estructuras de sostenimiento lateral o de bóveda de túneles de ferrocarriles subterráneos que circulan bajo grandes ciudades, con el objetivo de climatizar las propias estaciones de ferrocarril o edificios situados en zonas próximas. La climatización de la estación U2/3 Praterstern del ferrocarril subterráneo de Viena constituye un ejemplo de esta aplicación.

OTROS SISTEMAS En este grupo se incluyen los sistemas que no pueden calificarse, de forma categórica, como abiertos o cerrados. Sería el caso de los *pozos de tipo columna* y de los aprovechamientos de aguas de minas y túneles.

- **Pozos de tipo columna**. El agua se bombea desde el fondo del pozo y, tras abandonar la bomba de calor, se filtra a través de la grava que rellena su anillo (Figura 5.18). Los pozos de este tipo necesitan alcanzar cierta profundidad para que el aporte de energía sea suficiente para que el agua no se congele, de modo que, en la mayoría de las instalaciones, las perforaciones tienen varios cientos de metros de profundidad. Se conocen ejemplos en Europa (Suiza y Alemania) y en EEUU. Considerando los costes de perforación, esta tecnología no resulta adecuada para pequeñas instalaciones.

Figura 5.18. Pozo tipo columna



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

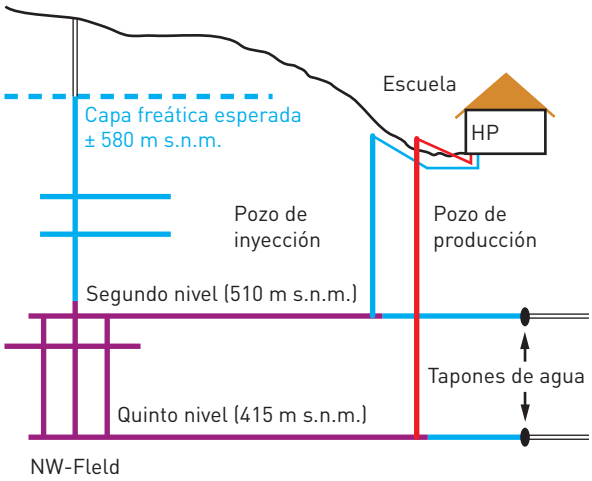
- **Aguas de minas y túneles**. El agua de esta procedencia tiene una temperatura constante durante todo el año y es fácilmente accesible. Los túneles a los que se hace referencia en este apartado son

[7]Una velocidad de 0,5 a 1 m/día es suficiente para disipar la energía transferida por los pilotes, impidiendo su almacenamiento (LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008)

los correspondientes a grandes obras de tunelación, que atraviesan macizos rocosos y drenan las aguas subterráneas que se encuentran a su paso. Estas aguas pueden constituir un potencial geotérmico importante, como sucede en Suiza, donde alcanzan, en grandes túneles, temperaturas de hasta 30 ºC. Aguas de este origen se utilizan en la localidad suiza de Oberwald, en el acceso oeste del túnel ferroviario de Furka, donde las aguas de éste (5.400 l/min de caudal y 16 ºC de temperatura) se transportan por gravedad hasta la ciudad para su aprovechamiento en la climatización de apartamentos y un centro deportivo. Igualmente, en Airolo, también en Suiza, el agua del túnel de carretera de Gotthard (6.700 l/min a 17 ºC) constituye la fuente de calor que alimenta una bomba geotérmica instalada para climatizar el centro de mantenimiento de la carretera. La construcción de un gran número de túneles en los Alpes abre las puertas al desarrollo de un nuevo potencial para el aprovechamiento de este tipo de fuente de calor.

Las antiguas explotaciones mineras subterráneas representan un caso particular de esta forma de uso del calor geotérmico. Sus galerías abandonadas proporcionan aguas subterráneas con un considerable potencial geotérmico. Cabe citar como ejemplo el Proyecto Barredo, en Asturias, que prevé concentrar las aguas de varios pozos cerrados o en vías de cierre, en un solo caudal, que se estima alcanzará los 10 hm^3/año, a una temperatura de 20 ºC, para uso en una bomba geotérmica destinada a la calefacción de instalaciones. Otro ejemplo es el de Ehrenfriedersdorf (Alemania), donde se aprovecha el agua de una mina de estaño abandonada en la instalación de climatización de una escuela (Figura 5.19).

Figura 5.19. Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con agua de mina



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

SISTEMAS TIERRA-AIRE. Permiten el pretratamiento del aire de renovación del sistema de ventilación de un edificio, mediante su circulación por un conjunto de tuberías enterradas –los denominados *pozos provenzales o pozos canadienses*–, que permiten, con un mínimo consumo, reducir el salto térmico existente entre el exterior y el interior del edificio. El aire así pre-acondicionado se conduce al recuperador de calor y a las climatizadoras reduciendo la carga térmica de la ventilación de manera notable. El edificio industrial y administrativo *Schwerzenbacherhof*, cerca de Zurich (Suiza), constituye un ejemplo de aplicación de estos sistemas, cuyo uso aún no está muy extendido.

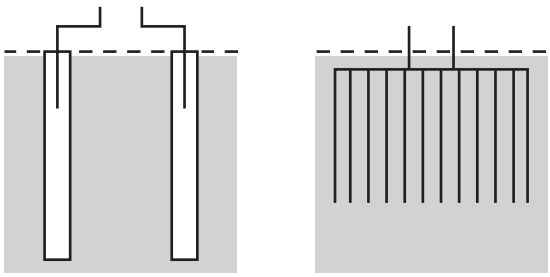
b) Sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES)

En estos sistemas, se almacena calor, frío o ambos bajo tierra. Los métodos de conexión con el subsuelo incluyen, como en el caso de la bomba de calor geotérmica, sistemas abiertos (ATES) y sistemas cerrados (BTES) (Figura 5.20):

- *Almacenamiento en acuíferos* (ATES: *Aquifer Thermal Energy Storage*). Estos sistemas, en los que el agua subterránea es el medio de transporte del calor, se caracterizan por su alta porosidad, su media a baja conductividad y transmisividad hidráulicas y su reducido o nulo flujo de agua subterránea. Son un ejemplo los acuíferos porosos en arenas, gravas y eskers, y los acuíferos fracturados en calizas, areniscas y rocas ígneas o metamórficas.

- *Almacenamiento en perforaciones* (BTES: *Borehole Thermal Energy Storage*). Los almacenes de este tipo incluyen perforaciones y tuberías, y requieren un terreno con alto calor específico, conductividad térmica media y ausencia de flujo de agua subterránea. Sedimentos como esquistos, margas o arcillas; calizas, areniscas y otros; rocas ígneas como granito o gabro, y algunas metamórficas como gneis, son ejemplos de estos sistemas de almacenamiento.

Figura 5.20. Sistemas de almacenamiento subterráneo del calor geotérmico



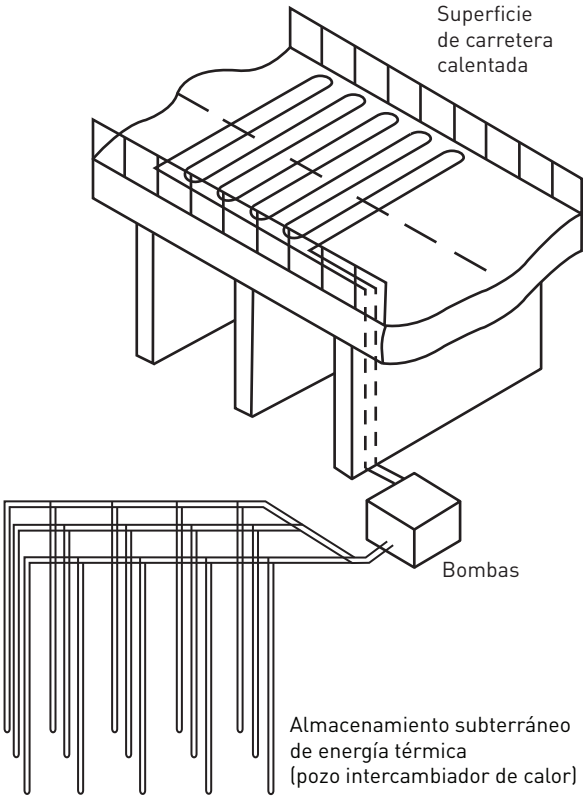
Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

El almacenamiento de frío es cada vez más frecuente, ya que los costes de refrigeración de espacios son, habitualmente, bastante elevados.

Una combinación de almacenamiento de frío y calor es la conexión de superficies de calles y carreteras a un sistema UTES. Se puede almacenar el calor de la radiación solar en la superficie y utilizarlo en el invierno para derretir el hielo y la nieve acumulados sobre dicha superficie (Figura 5.21). Este sistema se emplea principalmente en puentes, pero puede aplicarse a cualquier otra superficie de carreteras, pistas de aterrizaje en aeropuertos, etc.

El almacenamiento de calor permite acumular el procedente de la radiación solar o el calor residual del verano y utilizarlo para calefacción en el invierno. Ejemplos de estas aplicaciones son la instalación de Neckarsulm (Alemania), donde un sistema BTES se recarga con calor procedente de placas solares y se aprovecha en un sistema de calefacción de distrito, y la existente en Berlín, donde el calor residual procedente de una planta de cogeneración de calor y electricidad en el verano, se almacena en un ATES para su uso en calefacción durante el invierno. La planta berlinesa suministra calor y frío a los edificios del Parlamento Alemán –el Reichstag y las oficinas de alrededor– y, por vez primera, incorpora dos sistemas ATES a diferentes niveles: el superior para el almacenamiento de frío y el inferior para el almacenamiento de calor (hasta 70 ºC).

Figura 5.21. UTES para deshielo de superficies de carreteras



Fuente: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar

Probablemente, el sistema de campos de sondas geotérmicas sea el más adecuado para los sistemas de almacenamiento de calor, si bien todos los que se han descrito constituyen potenciales almacenes de calor (o de frío). Para comparar estos sistemas con instalaciones convencionales, sin almacenamiento de calor –o frío– residual, y comprobar su rentabilidad, es preciso un estudio detallado del sistema de recuperación de calor y de los costes añadidos, así como una estimación del ahorro asociado a su funcionamiento durante el período de su vida útil.

5.2.3.2 Yacimientos profundos

Como ya se señaló con anterioridad, los recursos geotérmicos de baja entalpía (T < 100 ºC) pueden utilizarse para el aprovechamiento directo del calor. En

numerosos casos, estos recursos se localizan en almacenes sedimentarios profundos (2.000-2.500 m), accesibles mediante perforación. Para que su uso en sistemas de calefacción resulte rentable, se requiere una importante demanda a poca distancia del aprovechamiento, al objeto de minimizar los costes asociados a los mecanismos de transporte del calor.

En los sistemas de uso directo que explotan los recursos de baja temperatura localizados en almacenes sedimentarios profundos, se perfora un sondeo en el almacén geotérmico para obtener un flujo constante de agua caliente (fluido geotérmico). A través de este sondeo, el agua se conduce, generalmente por bombeo (si el pozo es artesiano, el agua fluye de forma natural), hasta la superficie y, mediante un sistema mecánico constituido por tuberías, un intercambiador de calor y dispositivos de control, cede directamente el calor para el uso previsto. La explotación se realiza mediante *doblete* de sondeos, uno para extraer el fluido geotérmico –sondeo de extracción o explotación– y otro para reinyectarlo –sondeo de inyección–, ya enfriado, en el mismo yacimiento del que se obtuvo.

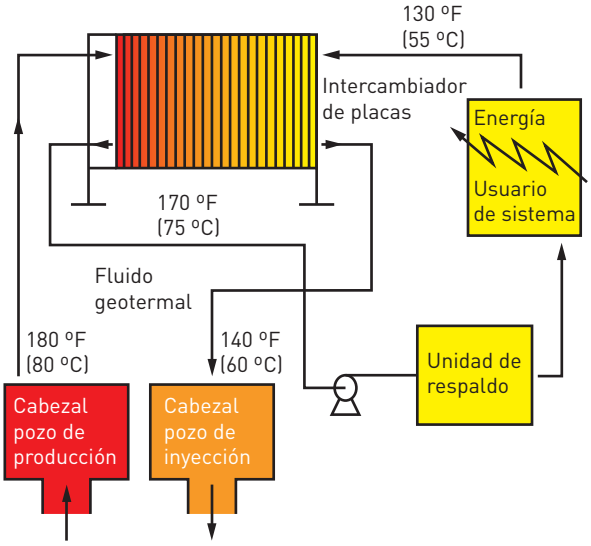
En un sistema de uso directo debe evitarse la entrada de oxígeno –el agua geotérmica normalmente no contiene oxígeno– y han de eliminarse los gases y minerales disueltos, como boro, arsénico y sulfuro de hidrógeno, para evitar problemas de corrosión, precipitación y obstrucción de tuberías y conducciones. El CO_2, a menudo presente en el agua geotermal, puede extraerse y utilizarse para bebidas carbonatadas o para mejorar el crecimiento en invernaderos.

El equipamiento típico para un sistema de uso directo, representado en la Figura 5.22, incluye bombas sumergidas y de circulación, intercambiadores de calor –normalmente, de placas–, líneas de transmisión y distribución –habitualmente, tuberías térmicamente aisladas–, equipos de extracción de calor, generadores para reducir el uso de agua geotérmica y el número de pozos requeridos, y sistemas de eliminación de agua (sondeos de inyección).

Los fluidos geotérmicos de almacenes sedimentarios profundos, al circular calientes a través de la roca, se convierten en salmueras con elevados contenidos en sales disueltas, motivo por el que no pueden conducirse directamente hasta los puntos de demanda final. Por ello, se utilizan intercambiadores que permiten la cesión del calor contenido en el fluido geotérmico a otro fluido (normalmente, agua), que forma parte de un circuito cerrado o secundario, correspondiente a la red de distribución a los puntos de demanda. El fluido geotérmico, tras ser bombeado al intercambiador y ceder su calor, se reinyecta en el yacimiento, con objeto de mantener la presión en el mismo y de evitar el deterioro ambiental que, dado su alto contenido salino, podría causar su vertido.

Como ya se ha indicado, los intercambiadores de calor utilizados habitualmente son de placas, más versátiles y con mayor capacidad de transferencia de calor. Además, su montaje por módulos permite una mejor adaptación a las necesidades de cada caso y facilita las tareas de mantenimiento y reparación.

Figura 5.22. Configuración típica de un sistema de uso directo del calor geotérmico para calefacción



Fuente: KAGEL, A. The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology. Geothermal Energy Association. January 2008

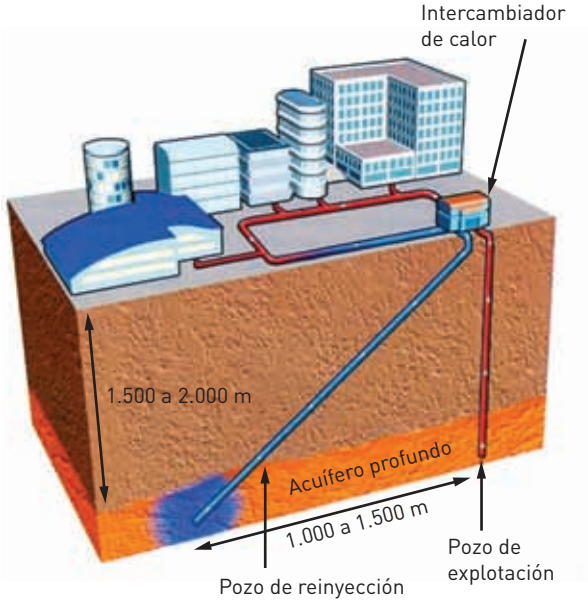
La perforación de sondeos para el aprovechamiento de almacenes sedimentarios profundos puede realizarse mediante sistemas convencionales, idénticos a los empleados en investigaciones geológicas o geotécnicas. Los sondeos de extracción e inyección se pueden perforar en superficie a pocos metros de distancia entre sí, utilizando una sola plataforma de perforación. En profundidad, dichos sondeos pueden ser totalmente verticales o desviarse, al menos uno de ellos, a partir de cierta profundidad, para que, de este modo, ambos estén notablemente distanciados en la zona del yacimiento (Figura 5.23). La distancia en profundidad entre los dos sondeos debe determinarse previamente, para evitar que el avance del frente frío producido por la inyección

del fluido alcance de modo significativo al punto de extracción en la vida del *doblete* (20-25 años). Numerosos autores recomiendan que la distancia entre sondeos no sea inferior a un kilómetro.

El esquema recogido en la Figura 5.23, que muestra una aplicación típica de la energía geotérmica en el sector residencial y de servicios, incluye tres circuitos:

- *Circuito primario*, formado por el equipo de bombeo y acondicionamiento del agua geotérmica –situado en la boca del sondeo de extracción–, un intercambiador de calor de placas, que transfiere el calor al circuito de distribución, y el sistema de reinyección de agua fría al yacimiento.
- *Red de distribución*, constituida por el sistema cerrado de tuberías para la distribución de agua caliente a los puntos de demanda.
- *Circuito de distribución privado*, que se desglosa en otros dos circuitos, debido a su distinto nivel térmico: uno abierto de agua caliente sanitaria (ACS) –formado por un intercambiador de calor, un depósito acumulador y un sistema de apoyo para suplir un posible déficit de calor geotérmico– y uno cerrado de calefacción –constituido por un intercambiador, las tuberías de distribución, los emisores de calor y un sistema de regulación y control–.

Figura 5.23. Sistema de explotación de yacimientos profundos para uso directo mediante doblete de sondeos



Fuente: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008

Cabe señalar que los sistemas de climatización geotérmicos se adaptan mejor a las instalaciones de calefacción de baja temperatura –suelos radiantes o radiadores de baja temperatura– que a los antiguos sistemas que emplean radiadores con agua a muy alta temperatura.

6 Metodología de evaluación del potencial geotérmico

6.1 INTRODUCCIÓN

En el Anexo 1 se presenta el documento elaborado sobre metodologías de evaluación de recursos geotérmicos. A continuación se describe un resumen de este documento, cuyo fundamento se ha utilizado en capítulos posteriores para la estimación de rangos en diferentes zonas de España.

La mayor parte de los conceptos utilizados para describir las cantidades aprovechables de una determinada sustancia tienen sus orígenes en la industria minera (SCHANZ, 1975)[8], ante la necesidad no solo de conocer cuánto mineral se podría extraer de un yacimiento conocido, sino también de evaluar la extensión y límites del mismo para llevar a cabo las necesarias previsiones económicas de explotación.

En minería ha sido siempre muy frecuente el empleo de nombres más o menos descriptivos (depósito, reserva, recurso...) acompañados de un adjetivo (probado, probable, posible, identificado, supuesto, submarginal, subeconómico, etc.), que han sido utilizados de manera distinta por los diferentes autores. La combinación de estos adjetivos con los nombres referidos ha dado origen a numerosas clasificaciones que difieren en función del país, autor, sustancia mineral, etc.

Los esfuerzos de los grupos industriales y equipos gubernamentales para homogeneizar la terminología fueron resumidos en 1975 por el citado JJ. Schanz. A partir de este trabajo se adoptó el criterio general, tanto por parte europea como americana, de clasificar las reservas m inerales y de combustibles fósiles en función de los parámetros propuestos por McKelvey[9] en 1972: el grado de factibilidad econó mica de la explotación y su grado de riesgo geológico. Se reconoció también la necesidad de especificar dos nuevos conceptos, el primero denominado **reserva** ligado a la rentabilidad en el momento de la clasificación y el segundo denominado **recurso**, ligado a la rentabilidad que eventualmente podría generarse con igual criterio en un tiempo futuro, con diferentes precios de mercado y nuevas tecnologías. El concepto de reserva, por tanto, es el normalmente utilizado en decisiones a corto plazo, mientras que el de recurso tiene ya implicaciones más estratégicas, políticas y de inversiones a largo plazo.

6.2 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

La diversidad de clasificaciones empleadas a la hora de evaluar el potencial de la energía geotérmica, utilizan premisas de partida distintas en cada caso e, incluso, diferente terminología, circunstancia que ha dado lugar a cierta confusión en lo relativo a aspectos tales como:

- Las diferentes profundidades útiles de extracción que se asumen en los diversos modelos,
- La diversidad de coeficientes de recuperación supuestos,
- El grado de importancia asignado al concepto de renovabilidad,
- Los usos a los que se destine,
- La relación entre la energía existente en el yacimiento, la extraída y la utilizada,
- Las unidades de medida, sobre todo en lo que se refiere a las conversiones de energía térmica a capacidad eléctrica, etc.

Existen, sin embargo, tres definiciones básicas para las que el sector de la energía geotérmica manifiesta un acuerdo prácticamente unánime:

- **Yacimiento geotérmico**. Volumen de roca permeable y caliente, geométricamente definida, de la cual se puede extraer el calor utilizando como vector de transporte el fluido que contiene naturalmente o el introducido artificialmente.
- **Recurso geotérmico**. Energía térmica o calor contenido en la roca y/o en el fluido en ella almacenado que puede ser extraída por el hombre, de forma viable técnica y económicamente.
- **Evaluación de recursos y reservas geotérmicas**. Estimación de la cantidad de recurso existente en una determinada área de la corteza terrestre y de la fracción de esa cantidad que puede ser extraída o recuperada en un tiempo y en unas condiciones determinadas legales, económicas y tecnológicas.

[8]Schanz, J.J., Jr. (1975). Resource terminology: an examination of concepts and terms and recommendations for improvement. Palo Alto, Calif., Electric Power Research Institute. Research Project 336, August, 1975, 116 pp

[9]McKelvey, V.E. (1972). Mineral resource estimates and public policy. American Scientist 60, 32-40

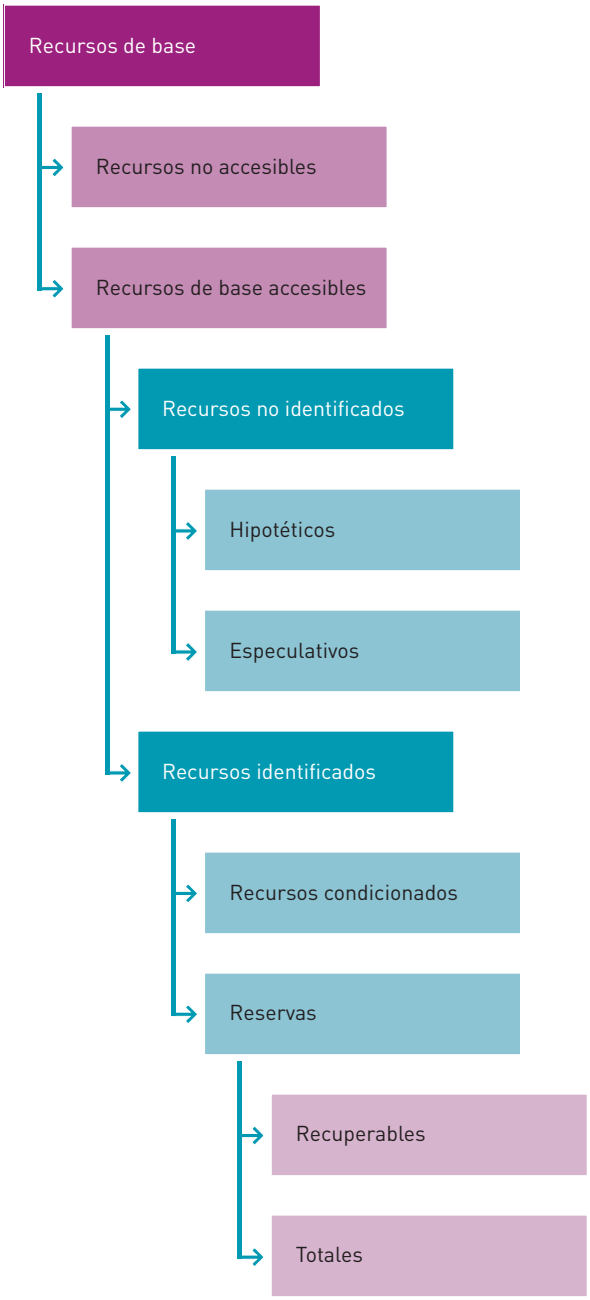
A partir de estas definiciones ha surgido una amplia variedad de conceptos, basados en los criterios que sus respectivos autores han considerado oportuno aplicar, como son:

- **Recurso geotérmico de base**. Calor contenido en la corteza terrestre desde la superficie hasta una profundidad, que puede estar comprendida entre 7 y 10 km (según autores), sin limitaciones de ningún tipo. Es el concepto más general.
- **Recurso geotérmico de base accesible**. Consiste en asignar al concepto anterior la limitación de que la profundidad máxima sea la correspondiente a la que hoy alcanzan habitualmente los pozos productivos. Según diferentes autores, esta profundidad se sitúa entre 3 y 7 km, siendo la primera el límite normal de los sondeos geotérmicos productivos, y la segunda el límite normal de perforación profunda sin excesivos problemas tecnológicos y a costes competitivos.

Estas interpretaciones han dado lugar a diferentes clasificaciones de los recursos geotérmicos, de las que se citarán a continuación tres de las más importantes como son las de Lavigne[10] (1978), Muffler y Cataldi[11] (1978) y la Mckelvey (McKELVEY, 1972; U.S.G.S., 1976)[12].

La clasificación de **Lavigne**, es de uso común en Francia, recoge las siguientes definiciones (ver Figura 6.1):

Figura 6.1. Clasificación francesa de recursos y reservas geotérmicas (Lavigne, 1978)



[10]Lavigne, J. Les resources geothermiques françaises – possibilités de mise en valeur. Ann. des Mines. April (1978)

[11]Muffler, L.J.P. y Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics, 7, pp. 53-89

[12]Mckelvey, V.E. (1972). Mineral Resource estimates and public policy. American Scientist 60, 32-40. U.S. Geological Survey (1976). Principles of the mineral resource classification system of the U.S Bureau of Mines and U.S. Geological Survey. U.S. Survey Bull. 1540-A, 5 pp

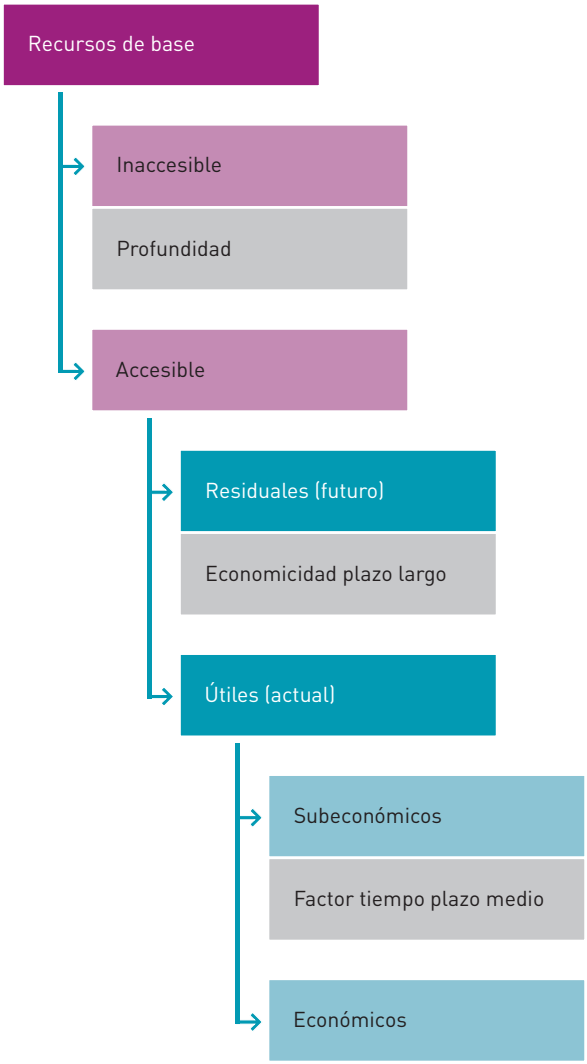
- **Recursos no identificados**. Divididos en hipotéticos y especulativos.
- **Recursos identificados por prospección**. Comprenden las reservas y los recursos condicionados.

Estos dos grandes grupos se subdividen, a su vez, en los siguientes:

- **Recursos hipotéticos**. Son recursos situados en regiones poco conocidas, contenidos en yacimientos perfectamente explotables con métodos clásicos, pero para los que es necesario precisar su localización y características. También puede comprender recursos no explotables con métodos clásicos, pero situados a una profundidad económica y a temperatura suficientemente elevada como para que se pueda emprender su prospección y explotación en un futuro no lejano.
- **Recursos especulativos**. Son los situados en rocas compactas a profundidades menores de 10 km y en regiones que no presentan anomalías térmicas. Sería una generalización de los de roca caliente seca.
- **Recursos condicionados**. Son recursos conocidos y evaluables, contenidos en un yacimiento geotérmico, pero no explotables en la actualidad por razones técnicas o económicas. Sería el caso, por ejemplo, de los recursos de baja entalpía situados lejos de los centros de consumo.
- **Reservas recuperables**. Es la porción de las reservas totales que se puede utilizar realmente. Su importancia depende estrechamente de la tecnología de explotación y puede, en condiciones óptimas, alcanzar el 60% de las reservas totales.
- **Reservas totales**. Son aquellos recursos identificados, contenidos en un yacimiento geotérmico, explotables técnica y económicamente en la actualidad. Son, por tanto, recursos cuya temperatura es mayor que la considerada no económica, situados próximos a los centros de consumo en el caso de ser de baja entalpía.

La clasificación propuesta por **Muffler y Cataldi** registra algunas variaciones respecto a la de Lavigne (ver Figura 6.2). En este caso, la separación entre recursos de base accesibles y no accesibles responde a los mismos criterios de profundidad ya expuestos. La división entre recurso residual y recurso útil es un criterio de economicidad en un futuro a largo plazo (30-50 años), en función de la tecnología existente y de la economía del producto. Se trata de un concepto riguroso pero muy difícil de cuantificar.

Figura 6.2. Clasificación de recursos y reservas geotérmicas (Muffler y Cataldi, 1978)



El **recurso de base accesible útil** representa la energía térmica que puede ser extraída a costes competitivos con otras formas de energía en el actual estado de desarrollo tecnológico y de mercado. Su subdivisión en **recursos subeconómicos y económicos** hace referencia al momento puntual en el que se considere cada caso, con un criterio de economicidad a corto-medio plazo (10-20 años). Se incluye en la categoría de subeconómica, aquella energía geotérmica que no puede ser extraída legalmente a costes competitivos en el momento concreto de la evaluación, pero que puede resultar competitiva ante pequeños cambios legales, situación del mercado –como precios de los combustibles fósiles–, etc.

Aunque existen líneas de investigación muy recientes que podrían alterar en el futuro algunas definiciones, en la actualidad, la clasificación más aceptada, tanto por los países de la Unión Europea como por el U.S. Geological Survey (EEUU), Australia y Japón, es la reflejada en el denominado **diagrama de McKelvey** (Figura 6.3) adaptado a geotermia, que incluye la mayor parte de los conceptos hasta ahora expuestos. En la Figura 6.4 se ofrece una versión simplificada del mismo recogida en la publicación *Australian Geothermal Code Committee* (2008), elaborada por las asociaciones Australian Geothermal Energy Group (AGEG) y Australian Geothermal Energy Association (AGEA).

Figura 6.3. Diagrama de McKelvey

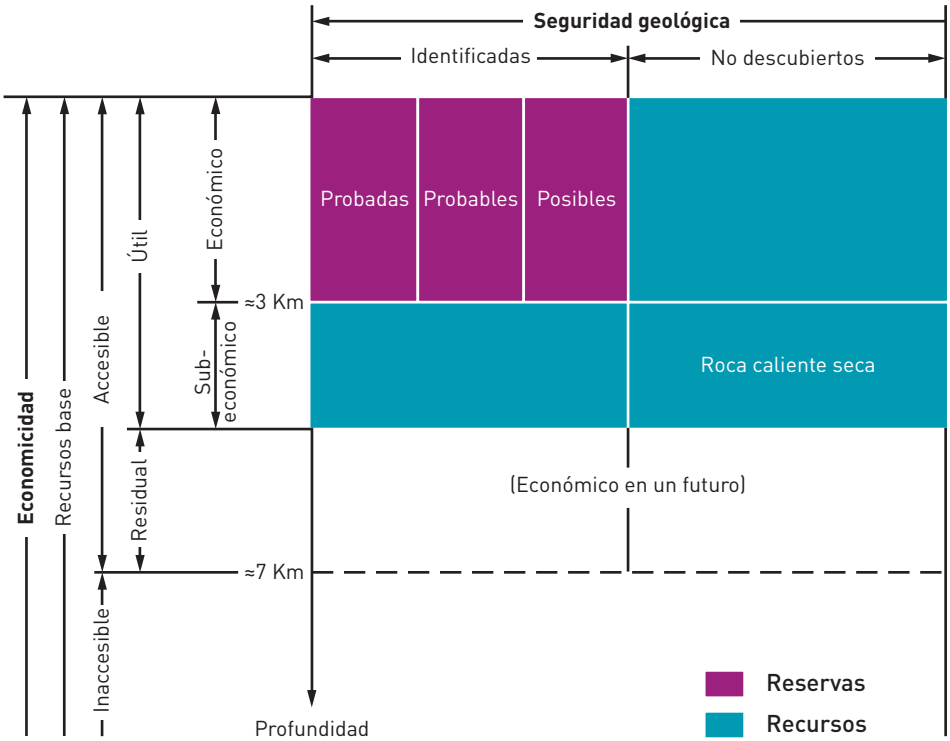
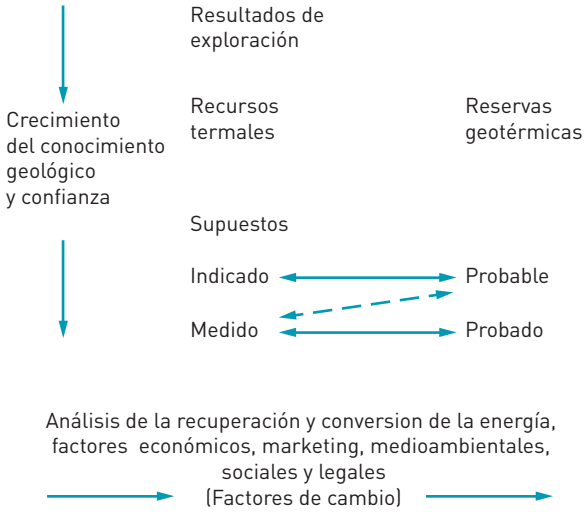


Figura 6.4. Relación entre resultados de exploración, recursos y reservas



El diagrama de McKelvey compara el grado de economicidad (en vertical, con cierta equivalencia con la profundidad) con el riesgo geológico (en horizontal). El criterio técnico-económico permite separar los recursos de base en "accesibles" e "inaccesibles" en función de la profundidad y competitividad. El riesgo geológico o seguridad geológica se valora en dos grandes categorías: el recurso "no descubierto" y el "identificado o reserva", entendiéndose como tal el que se ha caracterizado por alguno de los siguientes medios:

a) Criterios únicamente geológicos (posible).

b) Criterios geológicos, geofísicos y/o geoquímicos (probable).

c) Puesto en evidencia mediante perforación (probados).

En base a todas estas definiciones previas se establece la siguiente clasificación de los recursos geotérmicos, generalmente aceptada por los diferentes grupos investigadores e industriales:

- **Recurso base**: Todo el calor almacenado en la corteza terrestre, bajo un área concreta y en un momento determinado, tomando como límite térmico inferior la temperatura media anual de la zona, sin límite de profundidad y, por tanto, sin cuantificación posible.
- **Recurso base inaccesible**: Todo el calor almacenado en la corteza terrestre, entre la discontinuidad de Moho –límite entre corteza y manto– y una determinada profundidad (~ 7 km como límite de perforación), bajo un área concreta y en un momento determinado, tomando como límite inferior la temperatura media anual de la zona. Tampoco puede ser cuantificado.
- **Recurso base accesible**: Todo el calor almacenado entre la superficie terrestre y una determinada profundidad (~ 7 km como límite de perforación), bajo un área concreta y en un momento determinado, tomando como límite inferior la temperatura media anual de la zona.
- **Recurso base accesible útil = RECURSO**. Es la energía que podrá ser extraída económica y legalmente en un futuro próximo (100 años) incluyendo las reservas.
- **Recurso subeconómico**. Parte de los recursos de un área determinada que no pueden extraerse legalmente a un coste competitivo con otras fuentes energéticas convencionales en el presente, pero que podrán serlo en un futuro próximo por mejora de la tecnología y/o variación de los condicionantes económicos. Es el caso de los almacenes de roca caliente seca.
- **Recurso económico**. Parte de los recursos de un área determinada que pueden extraerse legalmente a un coste competitivo con otras fuentes energéticas convencionales en el momento presente.
- **Recurso económico no descubierto**. Parte de los recursos económicos de zonas inexploradas en regiones donde se tiene constancia de que existen recursos geotérmicos, o de regiones donde se supone su existencia por criterios geológicos pero aún no han sido descubiertos.
- **Recurso identificado**. Parte de los recursos económicos que pueden ser explotados, ahora o en un futuro próximo, debido a que existe un cierto conocimiento previo que los evidencia en mayor o menor grado.
- **Recurso identificado económico = RESERVA**. Es aquella parte de los recursos identificados, caracterizados por técnicas geoquímicas, geofísicas o perforación, que pueden ser extraídos económica y legalmente en la actualidad hasta una profundidad de 3 km.
- **Reservas probadas**. Parte de las reservas que se han evidenciado mediante perforación y medidas directas, y que pueden producir energía a costes competitivos en el momento de su determinación.
- **Reservas probables**. Parte de las reservas que han sido puestas de manifiesto mediante investigación geológica, geoquímica y/o geofísica pero sin llegar a perforarse si bien, en caso de alumbrarse, resultarían productivas a costes competitivos o en el momento de su determinación.
- **Reservas posibles**. Parte de las reservas cuya existencia está basada solamente en criterios geológicos pero que, de extraerse, resultarían económicamente competitivas en el momento de su determinación.

6.3 ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS: EL MÉTODO VOLUMÉTRICO

Mientras la estimación de recursos y reservas de minerales y combustibles fósiles ha sido una disciplina normalmente aplicada a lo largo de este siglo, la valoración del potencial geotérmico constituye un campo de investigación mucho más novedoso, razón por la que las metodologías de evaluación no están estandarizadas. Por otra parte, en cada país y en cada caso concurren una serie de condicionantes específicos que pueden resumirse en los siguientes:

- **Factores geológicos y físicos**: distribución de la temperatura, calor específico de la roca, porosidad eficaz total, permeabilidad, modelo de circulación de los fluidos, tipo de fase fluida, profundidad del almacén, etc.
- **Factores tecnológicos**: tecnología de perforación, tecnología de explotación del yacimiento, factores de conversión de la energía térmica en energía eléctrica, factores de utilización de la planta, utilización de los fluidos de descarga, etc.

- **Factores económicos**: costes de explotación de las plantas de utilización, costes financieros, precios de la energía convencional, valor de la propia energía geotérmica, etc.
- **Factores ligados al marco institucional**: legislación vigente, oportunidad de desarrollar otras fuentes energéticas locales, factores sociales, limitaciones ecológicas, etc.

De entre todos estos factores, algunos no resultan muy difíciles de evaluar objetivamente, como sucede con los tecnológicos y los económicos a corto plazo. Otros, sin embargo, pueden resultar más difícilmente previsibles (evolución de los precios de la energía, política energética del país, etc.). La evaluación del potencial geotérmico se hace progresivamente más difícil a medida que se pasa a escalas de trabajo más localizadas.

Los métodos cuantitativos para evaluar recursos geotérmicos se suelen agrupar en cuatro categorías:

- Método del flujo térmico superficial.
- Método volumétrico.
- Método de fracturas planas.
- Método de aporte de calor magmático.

El segundo de ellos es el de aplicación más generalizada y por lo tanto el utilizado en el presente proyecto, siguiendo con ello además, las recomendaciones del Pliego de Condiciones Técnicas.

El método volumétrico, también denominado método del "calor volumétrico" o del "calor almacenado" o *"heat in place"*, basa su principio en calcular la energía contenida en un cierto volumen de roca. Este método ha sido el empleado por la Unión Europea en la elaboración de los diferentes Atlas de Recursos Geotérmicos publicados hasta la fecha (1988 y 2002). Asimismo, numerosos autores han utilizado este método en sus trabajos de cuantificación de recursos geotérmicos en Wairakei y Broadlands (Nueva Zelanda), en Kawerau también de Nueva Zelanda, en Ahuachapán en El Salvador, en Pauzhetsk (Kamchatka), en Italia, en los sistemas convectivos de EEUU, en Takinoue en Japón y en muchos otros. El método también se ha adoptado, de manera mucho más esquemática, para numerosos estudios a escala continental.

El primer paso a realizar para aplicar el método es calcular el recurso accesible de base, es decir, la energía térmica existente in situ hasta una determinada profundidad, refiriendo todos los cálculos a la temperatura media anual (T_0) en superficie.

En la práctica, se lleva a cabo una aproximación dividiendo la porción de corteza superior bajo un área determinada en una serie de intervalos, que normalmente corresponden a las unidades geológicas, y se estima a continuación la temperatura de cada volumen. Se puede proceder entonces de dos maneras:

- Estimando un calor específico volumétrico y calculando la energía térmica total contenida en la roca y en el agua, o bien
- Estableciendo un valor para la porosidad total de cada volumen y calculando separadamente la energía contenida en la roca y en el fluido.

Los resultados obtenidos mediante estos dos métodos no difieren, por lo general, en más del 5% si la porosidad total es inferior al 20%, que es lo más habitual en los ámbitos geológicos más generalizados, y el fluido que rellena los poros es agua líquida. La segunda modalidad pone de manifiesto que, en casi todos los almacenes, el 90% de la energía térmica se halla contenida en la roca y solo el 10% en el agua.

Para la estimación de los **Recursos de Base Accesible** (RBA) se ha utilizado la fórmula:

$$RBA_i\,(Julios) = V_i\,(m^3)\cdot \rho_i\,(\frac{Kg}{m^3})\cdot C_i\,(\frac{Julios}{Kg\cdot {}^oC})\cdot \frac{T_i - T_0}{2}\,({}^oC)$$

En la que

RBA_i = Recurso de base accesible a la profundidad i.

V_i = Volumen del terreno desde la superficie hasta la profundidad i.

ρ_i = Densidad media de la columna rocosa hasta la profundidad i. Para los materiales existentes en nuestro subsuelo se toma como valor medio ρ_i = 2.650 kg/m^3.

C_i = Capacidad calorífica media de la columna rocosa hasta la profundidad. Para los materiales presentes en nuestro subsuelo se ha tomado C_i = 900 Julios/kg ºC.

T_i = Temperatura a la profundidad i. A falta de datos directos de sondeos de la zona de cálculo se toma el valor de temperatura estimada para un gradiente geotérmico de 30 ºC/km.

T_0 = Temperatura media anual en superficie.

El método volumétrico permite fijar con buena precisión los recursos geotérmicos mediante

el concepto de elementos finitos. De hecho, casi siempre es posible subdividir la región de estudio en zonas distintas, en función de sus condiciones geológicas. En vertical, la separación debe realizarse en forma de unidades litológicas a las que se atribuya una potencia, porosidad y temperaturas medias.

En zonas donde la información geológica, térmica o de sondeos es insuficiente o inadecuada, siempre se puede estimar la temperatura del almacén mediante geotermometrías químicas. Esta aproximación requiere fijar un techo y una base al almacén y suponer que sus aguas se hallan en equilibrio térmico con la roca del acuífero.

Para cada una de estas unidades o formaciones geológicas permeables se calcula el calor almacenado –*heat in place,* en inglés.

De acuerdo con la formulación recomendada por la Unión Europea en sus Atlas de Recursos Geotérmicos, este calor almacenado se estima con la siguiente relación:

$$H_0\,(Julios) = [(1-\varnothing)\rho_r\, C_r + \varnothing\, \rho_a\, C_a]\cdot(T_t - T_0)\cdot S\cdot e$$

En la que:

H_0 = Calor almacenado en la formación (Julios).

$\varnothing$ = Porosidad eficaz de la formación (adimensional).

ρ_r = Densidad de la roca almacén (kg/m^3).

C_r = Capacidad calorífica de la formación (Julios/kg ºC).

ρ_a = Densidad del agua de formación. A falta de datos se toma 1.000 kg/m^3.

C_a = Capacidad calorífica del agua de formación: 4.186 Julios/kg ºC.

T_t = Temperatura media del almacén.

T_0 = Temperatura media anual en superficie.

S = Superficie en planta del área considerada del almacén, por lo tanto se refiere a la superficie efectiva de la parte de la formación geológica que puede considerarse almacén.

e = Espesor medio útil del almacén geotérmico. Si no se tienen datos concretos se utiliza el mayor espesor conocido de la formación geológica.

Como ya se ha referido, solo una pequeña fracción del recurso accesible de base puede extraerse a la superficie constituyendo el recurso geotérmico (H_R). Para su evaluación debe conocerse la porosidad eficaz de la formación almacén y fijar el modelo de transporte del fluido a la superficie, sea en forma de agua, vapor o mezcla bifásica, así como el sistema de gestión de los fluidos de rechazo-reinyección o eliminación en superficie.

La cantidad de energía geotérmica extraíble (H_R) a partir de un volumen dado de roca y agua dependerá de una serie de factores geológicos y físicos, tales como el modelo de producción elegido, la temperatura y la presión de producción en cabeza de pozo. Ello implica, pues, la necesidad de disponer de una serie de parámetros que sólo resultan cuantificables cuando existen pozos en producción en la zona y su ingeniería de producción está resuelta, lo que no siempre es posible. En tales circunstancias, muchos autores han optado por utilizar el llamado "**factor de recuperación**", descrito en los términos que se expresan en el siguiente apartado.

6.4 FACTOR DE RECUPERACIÓN

En línea con lo expuesto anteriormente acerca de la utilización en geotermia de conceptos derivados de la industria minera, resulta de especial importancia hacer distinción entre la cantidad total de sustancia mineral que contiene un depósito y la parte de éste que puede ser extraída bajo unas condiciones económicas y tecnológicas concretas. Este factor recibe el nombre genérico de "recuperación" y equivale al contenido del depósito total multiplicado por un "factor de recuperación". Para algunas menas metálicas el factor de recuperación es casi igual a la unidad, por lo que no necesita ser tomado en cuenta en la evaluación de recursos y reservas. Para otros minerales y combustibles fósiles, sin embargo, una fracción significativa del depósito no puede ser nunca explotado.

La extensión del término "factor de recuperación" a la energía geotérmica permite definir el **factor de recuperación geotérmica como la relación entre energía geotérmica extraída y utilizada y la total contenida originalmente en un volumen subterráneo dado de roca y agua**.

El factor de recuperación (R) permite, pues, expresar la energía geotérmica extraíble como un porcentaje de la total contenida en un volumen determinado (V_i) del subsuelo, es decir:

$$H_R = R \times H_i$$

El factor de recuperación R depende, lógicamente, del mecanismo de producción, de la porosidad eficaz de la formación que constituye el volumen V_i y de la diferencia de temperatura entre el almacén y la cabeza de pozo.

En la práctica, en caso de necesidad de reinyección de la salmuera geotérmica (lo más generalizado) su valor es:

$$R = 0,33 \cdot \frac{T_t - T_i}{T_t - T_0}$$

Siendo T_t la temperatura de producción, T_i la temperatura de inyección y T_0 la temperatura media anual en superficie. En una primera aproximación y ante la falta de conocimiento del valor T_i, para las estimaciones realizadas, en este estudio se aplica R = 0,3 (aún sabiendo que puede llegar a adquirir valores ligeramente más bajos para T_i elevados).

En caso de no reinyectarse la salmuera fría (casos muy poco probables hoy en día), el valor de R es aproximadamente 0,1.

7 Los recursos geotérmicos en España. Definición y áreas de interés

7.1 INTRODUCCIÓN

En los siguientes apartados de este capítulo se presenta una descripción de los recursos geotérmicos existentes en el subsuelo español. Esta descripción incluye las características y potencialidad de cada recurso: zona de interés, condiciones geológicas, profundidad y temperatura del recurso, composición de fluidos, etc. Una cuantificación de los recursos y reservas existentes se realizará en un capítulo posterior.

Para llevar a cabo la descripción citada, se han clasificado los recursos en los siguientes grupos:

1. Recursos de Muy Baja Temperatura (T < 30 ºC).
2. Recursos de Baja Temperatura (30 ºC < T < 100 ºC).
3. Recursos de Media Temperatura (100 ºC < T < 150 ºC).
4. Recursos de Alta Temperatura (T > 150 ºC).
5. Recursos en Sistemas Geotérmicos Estimulados.

7.2 RECURSOS GEOTÉRMICOS DE MUY BAJA TEMPERATURA

Este tipo de recurso, como se ha mencionado en capítulos anteriores, existe prácticamente en todo el ámbito territorial estudiado y se debe a la constancia de la temperatura del subsuelo a partir de los 8-10 metros. Se presenta bajo dos formas: energía térmica contenida en las rocas del subsuelo y energía térmica contenida en los acuíferos someros.

7.2.1 Recursos de muy baja temperatura contenidos en las rocas del subsuelo. Mapas de potencia térmica superficial

Los recursos geotérmicos de muy baja temperatura contenidos en las rocas del subsuelo pueden ser extraídos y utilizados gracias al empleo de la bomba de calor y a la capacidad de extracción o cesión de calor de cada tipo de roca.

Las propiedades térmicas de las rocas del subsuelo son muy variables y dependen de una multitud de parámetros físicos y geológicos. Para la elaboración de proyectos de detalle es necesario calcular dichas propiedades mediante ensayos de respuesta térmica que se realizan en un sondeo perforado para dicha finalidad y que posteriormente puede ser utilizado para extracción de calor. Estos test suelen ser caros debido a su duración y al coste de la perforación, por lo que en los estudios preliminares de diseño de instalaciones se suelen utilizar valores estandarizados de las propiedades térmicas del terreno. Estos valores sirven de guía para una primera estimación del número de sondeos necesarios, si bien posteriormente antes de la elaboración del proyecto de la instalación debe realizarse el ensayo mencionado.

En la siguiente tabla se presenta una serie de valores estandarizados extraídos de la norma: VDI4640 Parte 2 – Uso térmico del subsuelo (Norma alemana de 2001).

Tabla 7.1. Capacidad de extracción de calor de las rocas (Modificado de la Norma VDI4640)

Tipo de roca (litologías)	Capacidad de extracción de calor (W/m)
Gravas y arenas secas	<25
Arcillas y margas húmedas	35-50
Calizas y dolomías masivas	55-70
Areniscas	65-80
Granitos	68-85
Rocas básicas (basaltos)	40-65
Rocas metamórficas (gneis)	70-85
Gravas y arenas saturadas de agua	65-80
Gravas y arenas con gran circulación de agua	80-100

A partir de esta información y teniendo en cuenta las litologías presentes en el **Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades de España, 1:200.000**, realizado por el IGME, dentro del "*Convenio para*

la realización de trabajos técnicos en relación con la aplicación de la Directiva Marco del Agua, en materia de aguas subterráneas" en su versión de mayo de 2008, se ha procedido a la elaboración de una tabla específica para dichas litologías, asignando a cada litología o unidad litológica definida en dicho mapa un rango de valor de la capacidad de cesión de calor o potencia térmica superficial. Se han definido cinco rangos teniendo en cuenta las propiedades físicas –térmicas e hidráulicas– de cada unidad litológica. En la tabla 7.2 se presenta una síntesis de los cinco grupos designados, con la tipología litológica correspondiente, características hídricas y rango de potencia térmica superficial.

Tabla 7.2. Grupos de litologías establecidas en función de características térmicas de la roca y potencial térmico correspondiente

Grupo	Tipo de litología	Caracterización hidráulica	Potencial térmico superficial (W/m)
A	Arenas, gravas arcillas y limos	Muy secos y nivel muy profundo (>30 m)	< 25
B	Arcillas y limos	Húmedos	30-50
C	Calizas, dolomías, basaltos y calcarenitas	Húmedos	40-60
D	Gravas, gravillas, arenas, areniscas, granitos y otras rocas metamórficas con esquistos y gneises	Húmedos. Nivel somero.	60-80
E	Gravas y arenas	Muy permeables, nivel muy somero y elevada circulación de agua	80-100

Con esta tabla resumen de características térmicas se ha procedido a un análisis detallado de todas las unidades litológicas definidas en el mapa antes mencionado, asignándoles a cada una de ellas uno de los grupos de la tabla anterior y por lo tanto un rango de valor de la potencia térmica superficial. Esto ha permitido elaborar el *Mapa de Potencia Térmica Superficial* de las rocas presentes en el subsuelo de España. Esta asignación de grupo a cada unidad litológica se presenta en la tabla 7.3, en la que se presenta el código de identificación litológica del Mapa antes mencionado, la descripción del tipo litológico, su grado de permeabilidad, su clasificación estratigráfica, zona de existencia y el rango de potencia térmica asignado.

Tabla 7.3. Valores de potencia térmica superficial asignada a cada litología

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
1	Rocas básicas metamorfizadas (metabasitas, anfiobolitas, serpentinitas)	Baja	Precámbrico-Paleozoico	Précambrico-Ordovícico		D
2	Rocas ácidas metamorfizadas (ortogneises, migmatitas). Gn. Gland,. metarriolitas (ollo S)	Baja	Precámbrico-Paleozoico	Precámbrico-Ordovícico inferior		D
3	Rocas volcánicas cambro-ordovícicas y stocks subvolcánicos tardihercínicos	Baja	Paleozoico	Cámbrico Medio-Pérmico		D
4	Rocas volcánicas y subvolcánicas paleozoicas	Baja	Paleozoico	Cámbrico Medio-Pérmico		C
5	"Rocas piroclásticas (""explosivas"") paleozoicas"	Baja	Paleozoico	Cámbrico Medio-Pérmico		C
6	Rocas plutónicas ácidas, hercínicas (granitos, granodioritas, cuarzodioritas)	Baja	Paleozoico	Carbonífero Medio-Pérmico		D
7	Rocas plutónicas básicas, hercínicas (gabros, dioritas, tonalitas, rocas ultramáficas)	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero Medio-Pérmico		D
8	Rocas filonianas ácidas, hercínicas (pórfidos, apliltas)	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero Superior-Pérmico		D
9	Rocas volcánicas ácidas (coladas dacíticas y tobas riolíticas)	Baja	Paleozoico	Carbonífero Superior-Pérmico		D
10	Rocas filonianas básicas e intermedias, hercínicas o tardihercínicas (diabasas, lampróf	Muy baja	Paleozoico-Mesozoico	Carbonífero Superior-Pérmico		D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
11	Filones de cuarzo	Muy baja	Paleozoico-Mesozoico	Carbonífero Superior-Pérmico		D
12	Ofitas y rocas volcanoclásticas (Ofitas del Keuper)	Baja	Mesozoico	Triásico		C
13	Gabro-diabasas del dique de Plasencia	Baja	Mesozoico	Triásico-Jurásico		D
14	Tobas volcánicas del Júrasico	Baja	Mesozoico	Jurásico		C
15	Lamproítas	Baja	Terciario	Neógeno		C
16	Esquistos negros, pizarras, cuarcitas negras, migmatitas, anfiobolitas, paragneises. Ser	Muy baja	Precámbrico		Ossa Morena/ Surportuguesa. Faja Pirítica Ibérica	D
17	Pizarras, areniscas, cuarcitas y, a veces, lentejones de carbonatos	Baja	Paleozoico	Devónico	Surportuguesa. Faja Pirítica Ibérica	D
18	Rocas volcánicas ácidas y básicas, pizarras, areniscas y jaspes. Complejo volcano-sedim	Baja	Paleozoico	Devónico Superior-Carbonífero Me	Surportuguesa. Faja Pirítica Ibérica	D
19	Pizarras, grauvacas y areniscas, a veces con calizas y rocas volcánicas. Facies Culm	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Ossa Morena/ Surportuguesa. Faja Pirítica Ibérica	C
20	Conglomerados, areniscas, lutitas rojas, carbón y rocas volcánicas básicas. Cuenca de V	Baja	Paleozoico	Pérmico	Ossa Morena/ Surportuguesa. Faja Pirítica Ibérica	C
21	Ortoanfibolitas. Complejo ofiolítico de Beja	Muy baja	Paleozoico	Silúrico Inferior-Devónico Infer	Surportuguesa. Pulo Do Lobo	C
22	Anfibolitas y esquistos verdes	Baja	Paleozoico	Devónico	Surportuguesa. Pulo Do Lobo	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
23	Pelitas con metagrauvacas, ortocuarcitas, tobas (y metabasaltos, en la base). Fm. Pulo d	Muy baja	Paleozoico	Devónico	Surportuguesa. Pulo Do Lobo	C
24	Pizarras y grauvacas. FLysch de Santa Iria	Muy baja	Paleozoico	Devónico	Surportuguesa. Pulo Do Lobo	C
25	Rocas volcánicas ácidas, lutitas, areniscas y conglomerados. Complejo Volc.-Sed. Malcoci	Baja	Precámbrico		Ossa Morena	C
26	Cuarcitas, pizarras, paragneises y micasquistos. Formación Albarrana	Baja	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena	D
27	Filitas y metareniscas. Formación Azuaga	Muy baja	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena	D
28	Areniscas arcósicas, esquistos, lutitas, conglom. Y rocas volc. Series Detríticas Inf.	Baja	Precámbrico-Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena / Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	C
29	Calizas marmóreas. Serie carbonatada de la Z. Ossa-Morena y Calizas de Urda	Alta	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena / Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	C
30	Metarcosas, migmatitas y micasquitos, con rocas volcánicas intercaladas	Baja	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena	C
31	Pizarras grises y moradas, y metavulcanitas básicas	Muy baja	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena	C
32	Espilitas y basaltos. Serie volcánica de Umbría-Pipeta	Muy baja	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena	C
33	Pizarras y areniscas. Formación Fatuquedo	Muy baja	Paleozoico	Cámbrico	Ossa Morena	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
34	Areniscas cuarcíticas, pizarras, limolitas, calizas y margas. Formación Barrancos	Media	Paleozoico	Ordovícico	Ossa Morena	D
35	Pizarras ampelíticas, a veces con liditas (y areniscas: Fm. Cañamares y Alcolea)	Muy baja	Paleozoico	Silúrico Inferior	Ossa Morena / Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	C
36	Pizarras, areniscas, cuarcitas y, a veces, calizas y rocas volcánicas. Flysch de Terena	Baja	Paleozoico	Devónico	Ossa Morena	D
37	Brechas, lutitas y areniscas. Cuenca de Valdeinfierno	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Ossa Morena	C
38	Conglom., areniscas, lutitas, calizas y rocas volcánicas. Alineac. Magmática de Villavicio	Media	Paleozoico	Carbonífero	Ossa Morena	C
39	Rocas plut.y volcan. Ácodas-básicas a ultramáf. Compi. Villaviciosa. La Coronada y Guada	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Ossa Morena	C
40	Conflomerados, areniscas, lutitas, carbón y rocas volcánicas. Cuenca de Peñarroya	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Ossa Morena	D
41	Metasedimentos, gneises blastomiloníticos, anfiobolitas y eclogitas. Unidad Central Z.Os	Muy baja	Precámbrico-Paleozoico	Precámbrico-Ordovícico inferior	Ossa Morena	D
42	Esquitos. Fm. Esquistos del Cubito	Muy baja	Paleozoico	Cámbrico-Devónico Inferior	Ossa Morena	D
43	Pizarras, grauvacas y esporádicos niveles carbonatados. Complejo Esquisto-grauváquico	Baja	Precámbrico		Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
44	Calizas, dolomías, pizarras, calcoesquistos y brechas intraformacionales	Baja	Precámbrico		Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	C
48	Areniscas, limolitas, pizarras, cuarcitas, congl.,vulc. Y esq. Bandeados, Altemancia	Baja	Paleozoico	Cámbrico-Ordovício Inferior	Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	C
49	Cuarcitas, conglomerados, areniscas y lutitas. Serie P rpura y Fm. Constante o Bornova	Baja	Paleozoico	Ordovícico Inferior	Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	D
50	Cuarcitas (C. Armonricana, F.Alto Rey, F. Culebra y Peñagorda) y alt. Ctas-aren.-piz. (Fm. Po	Baja	Paleozoico	Ordovícico	Ollo de Sapo / Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	D
51	Pizarras oscuras con interc. De aren., cuarc. Y sills basált. Piz.Río, Piz. Calymene, Fm.Ro	Muy baja	Paleozoico	Ordovícico	Ollo de Sapo / Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	D
52	Ctas., arenis,. Piz., caliz.Fm.Ar.Calymene y Cantera, Piz. Guindo y Chavera, B.Mixtos, Cz.Urb	Baja	Paleozoico	Ordovícico	Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	C
53	Cuarcitas, pizarras y, a veces, rocas volcánicas. Cuarcita de Criadero	Baja	Paleozoico	Ordovícico Superior-Silúrico Inf	Subzona Lusitano Oriental-Alcúdica	D
54	Areniscas, cuarcitas y pizarras (Capas de S.Pablo y Grupo Cerro Escudero). Brechas y co	Baja	Paleozoico	Devónico	Subzona Lusitano-Alcúdica	D
55	Calizas bioclásticas amarillentas (C.S. Pablo) y alternancias de calizas y pizarras	Media	Paleozoico	Devónico	Subzona Lusitano-Alcúdica	C
56	Pizarras y niveles de cuarcitas y vulcanitas (Capas de San Pablo)	Baja	Paleozoico	Devónico	Subzona Lusitano-Alcúdica	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
57	Pizarras con niveles de carbón (Cuenca de Puertollano)	Baja	Paleozoico	Carbonífero Superior-Pérmico Inf	Subzona Lusitano-Alcúdica	C
58	Areniscas, conflomerados y lutitas, rojos (Facies Buntsandstein)	Baja	Paleozoico-Mesozoico	Pérmico Superior-Triásico Inferio	Subzona Lusitana Oriental-Alcúdica / Cantábrica /	D
59	Cuarcitas feldespáticas. Cuarcitas de Dradelo	Baja	Paleozoico	Cámbrico	Ollo de Sapo	D
60	Esquitos, paragneises, cuarcitas feldespáticas y mármoles	baja	Paleozoico	Cámbrico	Ollo de Sapo	D
61	Esq., paragn., metar., metar., niv.carb./ calcosilic. Esq. Villalcampo, Serie del Duero, Metased. Sis	Baja	Paleozoico	Cámbrico	Ollo de Sapo	D
62	Mármoles, calizas y rocas de silicatos cálcicos	Media	Paleozoico	Cámbrico	Ollo de Sapo	C
64	Piz., cuarc. Y arenis. (Capas de los Montes). Esq., piz. y cuarc. (F.Puebla, Cerezal, Sta	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Ollo de Sapo	D
65	Pizarras y areniscas. Formaciones villaflor y Campillo	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Ollo de Sapo	C
66	Pizarras y cuarcitas. Fm. Casayo	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Ollo de Sapo	D
67	Calizas. Calizas de Aquina	Media	Paleozoico	Ordovícido	Ollo de Sapo / Asturoccidental - Leonesa	C
68	Pizarras. Fm. Rozadais	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Ollo de Sapo	C
69	Areniscas y pizarras. Fm. Losadillo	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Ollo de Sapo	D
70	Pizarras, ampelitas. E interc. De cuarcit. Y metavulc. Capas de Garganta, Fm. Ma	Baja	Paleozoico	Silúrico	Ollo de Sapo / Asturoccidental - Leonesa	D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
71	Aresnicas, pizarras y calizas. Capas de Saceda. Fm. Almendra	Media	Paleozoico	Superior-Devónico Inf	Ollo de Sapo / Asturoccidental - Leonesa	C
72	Conglomerados, pizarras y grauvacas. Fm. San Clodio	Baja	Paleozoico	Devónico-Carbonífero	Ollo de Sapo	C
73	Esquitos, esq. Grafit., filitas, cuarc.,ampel. Y Grupos Nogueira, Paraño y Fm. Ráb	Baja	Paleozoico	Ordovícico Superior-Devónico Inf	Galicia Tras Os Montes (Dominio Esquistoso)	C
74	Anfibolitas, metagabros, eclogitas, granulitas máficas, metaperidotitas, serpentinitasy esq	Baja	Paleozoico	Ordovícico Superior-Devónico Inf	Galicia Tras Os Montes (Dominio de los Complejos M	C
75	Esq., paragn., cuarc., metav.ácid., micaesq. Ordenes, C.Ortegal, Malpica-Tuy y Lalín-Forc	Baja	Paleozoico	Ordovícico Superior-Devónico Inf	Galicia Tras Os Montes (Dominio de los Complejos M	D
76	Pizarras, esquitos, metareniscas y gneises anfibólicos. Serie de Villalba	Baja	Precámbrico		Asturoccidental Leonesa	D
77	Areniscas, microconglom. Y pizarras, con niv. Carbonatados. Grupo Cándana y Aren. Herrer	Baja	Paleozoico	Cámbrico	Asturoccidental Leonesa / Cantábrica	D
78	Calizas y dolomías. Calizas de Vegadeo y Láncara	Alta	Paleozoico	Cámbrico	Asturoccidental Leonesa / Cantábrica	C
79	Pizarras, areniscas y cuarcitas. Serie de los Cabos	Baja	Paleozoico	Cámbrico	Asturoccidental Leonesa	D
80	Pizarras. Pizarras de Luarca y Sueve	Muy baja	Paleozoico	Cámbrico-Ordovícico Inferior	Asturoccidental Leonesa / Cantábrica	C
81	Areniscas, pizarras y cuarcitas. Fm Agreira	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Asturoccidental Leonesa	D
82	Cuarcitas. Cuarcita de Vega	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Asturoccidental Leonesa	D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
83	Brechas sedimentarias y niveles carbonosos	Baja	Paleozoico	Ordovícico Superior-Silúrico Inf	Asturoccidental Leonesa	C
84	Lutitas, areniscas y conglomerados	Baja	Paleozoico	Pérmico	Catalánides, Pirineos	C
85	Pizarras, areniscas y microconglomerados. Pizarras de Lancea	Baja	Precámbrico		Cantábrica	D
86	Cuarcitas, pizarras y rocas volcanocl. Y volcanosed. Cuarcita de Barrios Fm. Oville	Baja	Paleozoico	Ordovícido	Cantábrica	D
87	Rocas volcanodetríticas	Muy baja	Paleozoico	Ordovícido	Cantábrica	C
88	Areniscas ferrug., pizarras ampel. Y areniscas. Areniscas de S. Pedro y Furada. Fm. Formi	Baja	Paleozoico	Devónico Inferior	Cantábrica	D
89	Calizas, dolomías y lutitas. Fm. Rapeces, Abadía y La Vid	Media	Paleozoico	Devónico	Cantábrica	C
90	Calizas arrecifales. Calizas de Santa Lucía y Moniello	Alta	Paleozoico	Devónico	Cantábrica	C
91	Pizarras y areniscas. Pizarras de Huergas	Muy baja	Paleozoico	Devónico	Cantábrica	C
92	Calizas. Calizas de Portilla y de Candás	Alta	Paleozoico	Devónico	Cantábrica	C
93	Areniscas, pizarras y conglomerados. Fm. Ermita, Fueyo y Nocedo	Baja	Paleozoico	Devónico	Cantábrica	C
94	Calizas y lutitas, rojas. Caliza Griotte, Calizas de Alba, Vegamián, Baleas y Barcalien	Media	Paleozoico	Devónico Superior-Carbonífero Me	Cantábrica	D
95	Turbiditas	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	C
96	Calizas. Calizas de Valdeteja	Alta	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
97	Pizarras, lutitas, areniscas, carbón y calizas. Grupos Sama, Lena, etc.	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	D
98	Conglomerados. Fm. Curavacas	Alta	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	C
99	Calizas. Calizas de Picos, Escalada, etc.	Muy alta	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	C
100	Calizas. Caliza de Puentelles	Muy alta	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	C
101	Clonglomerados, areniscas, lutitas y carbón	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Cantábrica	C
102	Cuarcitas, pizarr., areniscas, lutitas, conglom., caliz. Y dolom. Paleozoico Sierra de	Baja	Precámbrico-Paleozoico	Precámbrico-Carbonífero Media	Cordillera Ibérica	D
103	Pizarra. Pizarras de Paracuellos	Muy baja	Precámbrico		Cordillera Ibérica	C
104	Cuarcitas, pizarras, areniscas, lutitas, calizas y dolomías. Paleozoico Ibérica Aragone	Baja	Paleozoico	Cámbrico-Ordovícico Inferior	Cordillera Ibérica	D
105	Pizarras,areniscas, cuarcitas, calizas y margas	Baja	Paleozoico	Ordovícico Medio-Inferi	Cordillera Ibérica	C
106	Pizarras, limolitas y cuarcitas	Baja	Paleozoico		Cordillera Ibérica	C
107	Cuarcitas, pizarras y areniscas	Baja	Paleozoico	Devónico Inferior	Cordillera Ibérica	D
108	Calizas, margas, cuarcitas y pizarras	Baja	Paleozoico	Devónico	Cordillera Ibérica	C
109	Pizarras, areniscas y pizarras arcillosas	Muy baja	Paleozoico	Devónico	Cordillera Ibérica	C
110	Pizarras, cuarcitas y areniscas	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Cordillera Ibérica	D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
111	Pizarras, areniscas, conglomerados y carbón	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Cordillera Ibérica	D
112	Areniscas y grauvacas	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Cordillera Ibérica	C
113	Riolitas, cineritas y grauvacas. Zona de Molina de Aragón	Baja	Paleozoico	Carbonífero	Cordillera Ibérica	C
114	Lutitas, areniscas, conglomerados y tobas volcánicas	Baja	Paleozoico	Pérmico	Cordillera Ibérica	C
115	Calizas. Zona de Molina de Aragón	Media	Paleozoico	Pérmico	Cordillera Ibérica	C
116	Alternancias de pizarras, areniscas y cuarcitas	Baja	Paleozoico	Pérmico	Cordillera Ibérica	D
117	Cuarcitas y pizarras	Baja	Paleozoico	Cámbrico-Ordovícico Medio	Catalánides, Pirineos	D
118	Areniscas, cuarcitas y pizarras	Baja	Paleozoico	Ordovícico	Catalánides, Pirineos	D
119	Rocas volcánicas	Baja	Paleozoico	Cámbrico-Ordovícico	Catalánides, Pirineos	C
120	Conglomerados, areniscas y lutitas	Baja	Paleozoico	Ordovícico	Catalánides, Pirineos	C
121	Pizarras	Muy baja	Paleozoico		Catalánides, Pirineos	C
122	Calizas, areniscas y lutitas	Baja	Paleozoico	Devónico-Carbonífero Inferior	Catalánides, Pirineos	C
123	Cuartitas, pizarras y calizas	Baja	Paleozoico	Devónico-Carbonífero Inferior	Catalánides, Pirineos	C
124	Calizas, pelitas y areniscas	Media	Paleozoico	Carbonífero	Catalánides, Pirineos	C
125	Grauvacas y pizarras. Facies Culm.	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero	Catalánides, Pirineos	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
126	Andesitas, riodacitas e ignimbritas	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero Superior-Pérmico	Catalánides, Pirineos / Cordillera Ibérica	C
127	Filitas, esquistos, cuarcitas, calizas, pizarras y comeanas (Rocas metamórficas)	Muy baja	Paleozoico	Carbonífero-Pérmico	Catalánides, Pirineos	D
128	Turbiditas, pelitas, areniscas y calizas	Muy baja	Paleozoico	Superior-Carbonífero Me	Menorca	C
129	Conflomerados, grauvacas, pizarras y areniscas	Baja	Paleozoico	Ordovícico Medio-Carbonífero sup	Maláguide	D
130	Calizas, calcoesquistos y pizarras	Alta	Paleozoico	Superior-Devónico Medio	Maláguide	C
131	Filitas, cuarcitas, micasquistos y yesos	Muy baja	Paleozoico-Mesozoico	Precámbrico-Triásico Medio	Alpujárride / Nevado Filábride	D
131	Filitas, cuarcitas, micasquistos y yesos	Muy baja	Paleozoico-Mesozoico	Precámbrico-Triásico Medio	Alpujárride / Nevado Filábride	D
132	Mármoles	Media	Paleozoico-Mesozoico	Precámbrico-Triásico Inferior	Alpujárride / Nevado Filábride	C
133	Micasquitos, cuarcitas y gneises	Muy baja	Precámbrico-Mesozoico	Precámbrico-Triásico	Nevado Filábride	D
134	Metabasitas (diabasas, serpentinitas, anfibolitas)	Baja	Mesozoico	Triásico	Alpujárride / Nevado Filábride	C
135	Mármoles	Alta	Mesozoico	Triásico	Nevado Filábride	C
136	Calizas, dolomías y mármoles	Alta	Mesozoico	Triásico	Alpujárride	C
137	Dolomías, calizas y margas (F. Muschelkalk)	Media	Mesozoico	Triásico	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo / Bale	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
138	Lutitas rojas, con niveles de yeso y dolomías	Muy baja	Mesozoico	Triásico		B
139	Lutitas rojas, areniscas, conglomerados, margas, dolomías y yesos	Muy baja	Mesozoico	Triásico	Cantábrica	B
140	Areniscas	Baja	Mesozoico	Triásico	Subbético y Circumbético de Baleares / Maláguide	D
141	Arcillas abigarradas y yesos, a veces con margas y arenisas (F. Keuper)	Muy baja	Mesozoico	Triásico	Cantábrica / Pirineos / Iberica, Maestrazgo / Bale	B
143	Dolomías	Alta	Mesozoico	Triásico	Subbético y Circumbético de Baleares	C
144	Dolomías y calizas	Alta	Mesozoico	Jurásico-Cretácico Inferior	Cantábrica	C
145	Conglomerados, areniscas, arenas, y a veces calizas, dolomías y margas	Baja	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica	C
146	Arcillas y areniscas	Baja	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica	C
147	Calizas, dolomías y margas	Alta	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica	C
148	Lutitas y margas	Baja	Mesozoico	Jurásico Superior-Cretácico Infe	Cantábrica	B
149	Lutitas, areniscas, conglomerados y, a veces, calizas arenosas	Baja	Mesozoico	Jurásico Superior-Cretácico Infe	Cantábrica / Pirineos	C
150	Dolomías, calizas dolomíticas y calizas	Muy alta	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica	C
152	Areniscas, arenas, calizas arenosas, margas, arcillas y margocalizas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica / Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Ba	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
153	Areniscas, lutitas y margas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica	C
154	Margas, margocalizas, calizas bioclásicas, calcarenitas, areniscas	Media	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica	C
155	Rocas volcánicas	Muy baja	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica	C
156	Dolomías y calcarenitas	Muy alta	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Paleógeno	Cantábrica	C
157	Dolomías, brechas dolomíticas, carnilas y calizas en bancos (Fm. Cortes de Tajuña)	Alta	Mesozoico	Triásico Superior-Jurásico Medio	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo / Bale	C
158	Calizas grises con crinoides	Alta	Mesozoico	Jurásico	Pirineos / Ibérica, Maestrazgo	C
159	Margas, calizas bioclásticas y margosas. Fm. Margas Cerro del Pez, etc.	Baja	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo / Preb	B
160	Calizas generalmente oolíticas, con nódulos de sílex y, a veces, margas (Fm. Carb. De Ch	Media	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo	C
161	Margas, calizas y margocalizas	Baja	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo	C
163	Calizas oncolíticas, pisolíticas	Media	Mesozoico	Jurásico	Ibérica, Maestrazgo	C
164	Dolomías y calizas	Alta	Mesozoico	Jurásico Superior (Malm)-Cretáci	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo	C
165	Calizas de oncolitos, Calizas de Higueruelas	Alta	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica	C
166	Conglomerados, areniscas, limolitas y calizas oolíticas. Facies Purbeck	Baja	Mesozoico	Jurásico	Cantábrica	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
167	Calizas, dolomías y margas. Facies Purbeck	Media	Mesozoico	Jurásico Superior (Malm)-Cretáci	Cantábrica	C
169	Calizas, calizas margosas y margas. Facies Weald	Baja	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica / Pirineos	B
170	Ortoconglomerados, arcillas, margas y calizas	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
171	Arcillas y limolitas. Facies Weald	Muy baja	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica / Pirineos	B
172	Calizas, dolomías, arcillas, areniscas y maergas abigarradas. Facies Weald	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
173	Calizas arrecifales, con rudistas, calizas bioclásticas, dolomías y margas	Muy alta	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica	C
174	Margas, calizas, arcillas y dolomías	Media	Mesozoico	Cretácico	Cantábrica / Pirineos / Ibérica, Maestrazgo / Preb	C
175	Arenas, arcillas, gravas y conglomerados (F. Utrillas), a veces con dolomías (F. Ar. Y Arc.	Media	Mesozoico	Cretácico	Pirineos / Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Bale	B
176	Calizas oquerosas rojizas y margas blancas	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
177	Lititas y areniscas (Faceis Flysch)	Muy baja	Mesozoico	Cretácico	Pirineos	C
178	Brechas y olistostroma	Media	Mesozoico	Cretácico	Pirineos	C
179	Areniscas y conglomerados	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	D
180	Calizas blancas con rudistas	Alta	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
181	Calizas, calizas oolíticas, margas, brechas y dolomías	Media	Mesozoico	Jurásico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
182	Dolomías	Muy alta	Mesozoico	Jurásico	Ibérica, Maestrazgo	C
183	Calizas, calizas margosas y margas	Media	Mesozoico	Jurásico	Ibérica, Maestrazgo	C
184	Calizas, margas y areniscas	Media	Mesozoico	Jurásico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
185	Arenas, areniscas, arcillas, calizas y margas. Facies Purbeck	Baja	Mesozoico	Jurásico-Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
187	Calizas, margas, arcillas y areniscas	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
189	Margas, calizas y areniscas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
191	Margas y calizas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
192	Arenas, areniscas y calizas con Toucasias y orbitolinas	Alta	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
193	Margas, calizas, calizas bioclásticas y/o arenosas y areniscas	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
194	Arenas y arcillas, con lignitos. Fm. Escucha	Baja	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	B
196	Arenas, margas y calizas	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
197	Calizas, dolomías, margas (Dol. Villa de Ves, Caballar, F. Tabladillo, Hontoría; Mgas. Chera)	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
198	Dolomías masivas. Dolomías de la Ciudad Encantada	Muy alta	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
199	Margas con niveles dolomíticos. Fm. Margas de Alarcón	Baja	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	C
200	Conglomerados y arcillas rojas (Zona de Sigüenza)	Media	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo	B
201	Calizas, dolomías, brechas dolomíticas y margas	Alta	Mesozoico	Cretácico	Ibérica, Maestrazgo / Prebético de Baleares	C
203	Arcillas, margas, yesos masivos y, localmente, arenas y gravas. Fm. Villalba de la Sier	Media	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Paleógeno	Ibérica, Maestrazgo	B
204	Calizas de gasterópodos, margas, margocalizas y, a veces, conglomerados y yesos	Media	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Paleógeno	Ibérica, Maestrazgo	B
205	Conglomerados, arenas y limos con sílice	Media	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Paleógeno	Ibérica, Maestrazgo	B
206	Dolomías, calizas y margas	Alta	Mesozoico	Jurásico	Prebético de Baleares	C
207	Calizas, margas, margocalizas, calcarenitas, calizas nodulosas y calizas oolíticas	Media	Mesozoico	Jurásico Medio (Dogger)-Cretácic	Prebético de Baleares	C
208	Calizas, margas, arenas silíceas, arcillas, calcarenitas, margocalizas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Prebético de Baleares	C
209	Calizas, calcarenitas, areniscas, margas y limos	Media	Mesozoico	Jurásico	Prebético de Baleares	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
211	Calizas, calizas con sílex, margocalizas, margas y margocalizas, con coladas basálticas	Meda	Mesozoico	Jurásico	Prebéticos, subbético y Circumbético de Baleares	C
213	Margas, margocalizas, radiolaritas y rocas volcánicas	Baja	Mesozoico	Jurásico	Subbético y Circumbético de Baleares	C
214	Calizas, dolomías y margas	Media	Mesozoico	Cretácico	Prebético de Baleares	C
215	Margas y margocalizas, a veces con arenas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Subbético y Circumbético de Baleares	B
216	Calizas	Alta	Mesozoico	Cretácico	Prebético, Subbético y Circumbético de Baleares	C
217	Dolomías, calizas y arenas	Alta	Mesozoico	Cretácico	Prebético de Baleares	C
218	Calizas con nummulites, margas y areniscas	Baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Paleógeno	Prebético, Subbético y Circumbético de Baleares	C
219	dolomías y, eventualmente, calizas	Alta	Mesozoico	Cretácico	Prebético de Baleares	C
220	Margocalizas y calizas	Alta	Mesozoico	Cretázico	Subbético y Circumbético de Baleares	C
221	Margas color salmón y margocalizas con sílex; margas blancas, verdes y rojas con int.ca	Baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Paleógeno	Subbético y Circumbético de Baleares	B
222	Dolomías, calizas oolíticas y margocalizas	Muy alta	Mesozoico	Triasíco-Jurásico	Maláguide y Dorsal	C
223	Margas y margocalizas	Muy baja	Mesozoico	Cretácico	Maláguide y Dorsal	B
224	Calizas con nummulites, margas y areniscas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Maláguide y Dorsal	C
301	Arenas y conglomerados	Alta	Cenozoico	Paleógeno	Cuencas Internas Gallegas	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
302	Arcillas, margas y calizas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuencas Internas Gallegas	B
303	Arenas y arcillas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuencas Internas Gallegas	B
304	Margas y calizas	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Guadiana	B
305	Conglomerados, gravas, arenas y lutitas rojas	Muy alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Guadiana	C
307	Gravas, arenas, lutitas. Calizas y margas	Alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Guadiana	D
308	Conglomerados, gravas, arenas y lutitas rojas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Guadiana	D
309	Basaltos, nefelinitas y volcanoclásticos	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Guadiana	C
310	Arenas, arcillas y conglomerados	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
311	Areis.cuarc., gravas silc.,conglom., arcillas rosadas, caliz., limolitas, y a veces yeso	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
312	Arenis.y microcongl. silíc., con rubefacc. (series Siderolíticas, Ar.de Salamanca, Ud. Tor	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
313	Arcosas, conglom. Y arcillas (Ar. De Cabrerizos y Villamayor). Lut. Y arenisc. Rojas (F.Al	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
314	Margas y arcillas blancas. Margas de Sanzoles	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
315	Calizas y margas. Calizas de Cubillos	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
316	Arenis.,lim y congl. ocres (Ar. Toro-Corrales, Limos de Geroma, Congl. villalazáz, G.Supr-Inf	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
317	Conglomerados y areniscas	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
318	Arcillas y limos	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
319	Breack.,conglom., lut. (cantos plut.o paleoz) (F. Olalla, Calzadilla, Peñalba, Escalonilla, Ming	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
320	Conglomer.,areniscas y arcillas, rojos (Facies Roja de Toro y Aspariegos, Conglom. De Be	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
321	Arcosas y lim. arc.,blanc.,gris-verd. U ocres, con costras (Pedraja Port., vill. Adaja, Pt	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
322	Lutitas arcósicas rojizas, con cantos cuarcíticos y arenas (Facies Peromingo)	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
323	Lutitas rojas con niv. conglm.,arenis. Y costras calcáreas (F. Sta María Campo y U.Detr.A	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
324	Conglomerados fcmte. calcáreos, areniscas y arcillas rojas y pardas (Compl.Vegaquemada, et	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
325	Margas, margocalizas y arcillas (Facies Dueñas)	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
326	Margas yesíferas y yesos (Facies Villatoro)	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
327	"Calizas y margocalizas (Calizas " "terminales" "de Dueñas)"	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
328	Limos y arenas ocres, con nivs. congl. y costras (F.Tierra de Campos, Serna, Villap.-Sah	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	A
329	Conglom.calcár y arc. rojizas (F. Alar del Rey, Compl.Cuevas, Facies Covarrubias)	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
330	"Calizas (Calizas" "terminales de Tierra de Campos", "al este de Burgos)"	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
331	Margas, margocalizas y arcillas (Facies Cuestas)	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
332	"Calizas y dolomías (Calizas" "intra. Cuestas", "Calizas de Arévalo"	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
333	Margas yesíferas y yesos (Facies Cuestas)	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
334	Arcillas rojas, con intercalaciones de areniscas, margas, calizas y costras (F. Tordóm	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B
335	Calizas y margas (Calizas del Páramo 1 o inferior)	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
336	Margas, limos, arenas y arcillas, ocres o rojas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
337	Gravas silíceas, conglomerados cuarcíticos y arenas (Ab. Cantoral, Guardo, Cegoñal, vidanes	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
338	Calizas, margocalizas y brechas calcáreas y oncolíticas (Calizas del Parámo 2)	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	C
339	Conglomerados cuarcíticos, gravas y arenas silíceas y arcillas (rañas y otras aluviales)	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Duerio, Asturias y Bierzo	E
340	Calizas, calcarenitas, dolomías y margas	Alta	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico superior-Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
341	Megabrechas	Alta	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
342	Lutitas y areniscas (Flysch)	Muy baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
343	Calizas y margas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
344	Areniscas y lutitas. Areniscas de Gongolaz	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
345	Conglomerados	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
346	Margas y margocalizas	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
346	Margas y margocalizas	Muy baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico Superior-Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	B
347	Sales potásicas	Muy baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	D
348	Alternancia de areniscas y lutitas, localmente conglomerados	Baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico Superior-Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
349	Calizas, localmente con lutitas	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
350	Lutitas, con intercalaciones de yesos y carbonatos	Muy baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
351	Conglomerados, con intercalaciones de areniscas y lutita	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
352	Conglomerados, con intercalaciones de areniscas, margas y niveles de yeso	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
353	Areniscas, lutitas, margas y, localmente, conglomerados	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
354	Arcillas y margas, con intercalaciones de areniscas y calizas	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	C
355	Yesos y arcillas, con alguna intercalación de halita	Muy baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/Pened	D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
356	Arcillas, yesos carbonatos, areniscas y, a veces, conglomerados	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
357	Calizas, localmente con lutitas	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
358	Conglomerados, con inercalaciones de areniscas y lutitas	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
359	conglomerados, areniscas y lutitas	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
360	Alternancia de areniscas y lutitas, localmente conglomerados	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
361	Lutitas con intercalaciones de areniscas	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
362	Lutitas y areniscas, a veces con yesos y calizas	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
363	Lutitas y margas, con intercalaciones de calizas y yesos	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	B
364	Yesos con intercalaciones de lutitas	Muy baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
365	Calizas, localmente con lutitas	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
366	Conglomerados, areniscas, lutitas y a veces margas y calizas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
367	Alternancia de areniscas y lutitas, localmente conglomerados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	B
368	Lutitas, con intercalaciones de areniscas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
369	Lutitas con intercalaciones de yesos y carbonatos	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	B
370	Yesos con intercalaciones de lutitas	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	B
371	Calizas, localmente con lutitas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
372	Conglomerados, areniscas, lutitas y a veces margas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
373	Alternancia de areniscas y lutitas, localmente conglomerados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
374	Lutitas con interalaciones de areniscas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
375	Lutitas con niveles de calizas y, a veces, yesos	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
376	Yesos con intercalaciones de lutitas	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	B
377	Calizas, localmente con lutitas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
378	Conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas. Costras a techo	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Ebro, Villarcayo, Cerdaña, Vallés/ Pened	C
379	Arenas y gravas. Fangos variolados	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
380	Conglomerados, limos, arenas y lutitas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
381	Conglomerados, areniscas, lutitas y calizas	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
382	Calizas, margas y calizas margosas. Intercalaciones de lutitas y conglomerados	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
383	Yesos	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
386	Areniscas, conglomerados y calizas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
387	Calizas y margas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
388	Conglomerados, arenas y lutitas	Baja	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
389	Calizas y margas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
390	Brechas calcáreas, conglomerados, areniscas arcillas y calizas	Alta	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
391	Yesos, margas, arcillas y calizas	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
392	Conglomerados	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
393	Conglomerado y areniscas, con arcillas y limos rojos	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
394	Arcillas rojas y areniscas. Conglomerados y calizas, subordinados	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
395	Arcillas, limos y arenas, con intercalaciones de areniscas y calizas	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
396	Margas y calizas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
397	Conglomerados, areniscas, lutitas, margas, calizas y lignitos	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
398	Arcillas con cantos y gravas, conglomerados y areniscas	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
399	Brechas calcáreo-dolomíticas, rojizas, generalmente con cemento calizo	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
400	Arcosas con cantos, conglomerados y arcillas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
401	Lutitas y yesos, con arcillas y areniscas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
402	Arcosas a veces con cantos, con lutitas, margas, calizas y, localmente nód. De sílex y	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
403	Lutitas, areniscas, conglomerados y, a veces, calizas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
404	Lutitas, margas blancas y niveles carbonatados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
405	Conglomerados y calizas travertínicas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
406	Calizas y margas blancas, a veces con nódulos de sílex y lignitos	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
407	Calizas, calizas margosas y margas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
408	Margas yesíferas y yesos, con arcillas, arenas y, eventualmente margas, calizas y sílex	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
409	Niveles de sílex y sepiolita	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
410	Calizas, dolomías y margas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
411	Conglomerados, areniscas y lutitas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
412	Arcosas gruesas, a veces con cantos, limos y fangos arcósicos	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
413	Margas, arcillas, yesos, conglomerados, areniscas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
414	Lutitas rojas y conglomerados. Lutitas y arenas ocres, a veces	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
415	Calizas y margas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
416	Yesos y margas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
417	Arcillas y lutitas (a veces, con cantos y yesíferas), areniscas y conglomerados	Baja	Cenozoico	Neógeno-Cuatermario	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
418	Calizas, margas, areniscas y limolitas	Media	Cenozoico	Paleógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
419	Calizas (a veces nummulíticas), areniscas, conglomerados, margas y arcillas	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
420	Conglomerados, arenas, arcillas, calizas y yesos	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
421	Margas y margocalizas	Baja	Mesozoico	Cretácico	Subbético y Circumbético de Baleares	B
422	Calizas, margas, limolitas, areniscas y conglomerados	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
423	Conglomerados poligénicos, areniscas y arcillas rojas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
424	Unidad olistostrómica-tectonosómica	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
425	Areniscas silíceas hacia la base, y margas blancas a techo	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
426	Calizas de algas, y margas blancas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
427	Calcarenitas	Muy alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
428	Turbiditas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
429	"Margas (""Margas Azules"")"	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
430	Conglomerados, gravas, arenas y limos (Formación Roja)	Alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
431	Conglomerados, brechas calcáreas, calcarenitas, areniscas y arenas (Faceis de borde)	Alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
432	"Margas (""Azules""), areniscas, arenas y, a veces, yesos"	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
433	Calcarenitas, arenas, gravas, limos y arcillas	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
434	Conglomerados, areniscas y calcarenitas (Facies de borde)	Alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
435	Conglomerados, arenas, arcillas, calizas, travertinos y yesos (Facies fluvio-lacustres)	Media	Cenozoico	Neógeno-Cuatermario	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
436	Rocas volcánicas peralcalinas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
437	Conglomerados, arenas y limos	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
438	Calizas arrecifales y calcarenitas	Alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
439	Conglomerados, arenas y limos	Media	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
440	Conglomerados, arenas y limos rojos	Muy alta	Cenozoico	Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	C
441	Yesos, con arcillas yesíferas y, a vece margas y limolitas	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
442	Limos con intercalaciones de margas. Calcarenitas y conglomerados	Media	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, Intrabéticas y del Guadalquivir	B
443	Conglomerados, areniscas y lutitas (Flysch)	Baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, intrabéticas y del Guadalquivir	B
444	Dolomías, calizas y margas	Alta	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Cuenca del Tajo, intrabéticas y del Guadalquivir	C
701	Gravas cuarcíticas, arenas silíceas y arcillas (Depósitos de rañas y otros aluviales fi	Media	Cenozoico	Cuatemario		E
702	Costras calcáreas. Dalles y costras laminares bandeadas y multiacintadas	Alta	Cenozoico	Cuatemario		C
703	Gravas, arenas, arcillas y limos (Depósitos de glacis, piedemonte y superficies)	Media	Cenozoico	Cuatemario		B
704	Gravas, arenas, limos y arcillas (Depósitos de terrazas medias y altas)	Alta	Cenozoico	Cuatemario		C
705	Bloques, cantos, limos y arcillas (Depósitos de ladera, coluviones, morrenas)	Alta	Cenozoico	Cuatemario		C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
706	Gravas, arenas, limos (Depósitos de aluviales, fondos de valle y terrazas bajas en los r	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario		E
707	Arcillas (Rellenos de depresiones kársticas)	Muy baja	Cenozoico	Cuatemario		B
708	Travertinos	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario		C
709	Arenas, limos arenosos y arcillas amarillentas	Alta	Cenozoico	Cuatemario		C
710	Conglomerados, arenas y arcillas	Media	Cenozoico	Cuatemario		C
711	Bloques, cantos, arcillas (Depósitos glaciares, canchales, coluviones de montaña)	Baja	Cenozoico	Cuatemario		C
712	Limos, arcillas, materia orgánica y sales (Depósitos de estuario, marismas y sedim. Lit	Baja	Cenozoico	Cuatemario		D
713	Arenas y graves (Cordones litorales y playas)	Alta	Cenozoico	Cuatemario		D
714	Arcillas, limos y cantos, turba (Depósitos de áreas endorreicas, dep. lacustres, turber	Baja	Cenozoico	Cuatemario		B
716	Gravas, arenas, limos, arcillas, limolitas, calizas (cuaternario indiferenciado)	Alta	Cenozoico	Cuatemario		D
717	Rocas volcánicas de Olot (tobas volcánicas, basaltos, brechas piroclásticas)	Muy baja	Cuatemario	Cuatemario		C
718	Coladas lávicas de basaltos, nefelinitas, etc. (Campos de Calatrava)	Baja	Terciario-Cuatemario	Neógeno-Cuatemario		C
719	Rocas piroclásticas (Campos de Calatrava)	Alta	Terciario-Cuatemario	Neógeno-Cuatemario		C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
720	Rocas freatomagmáticas (Campos de Calatrava)	Alta	Terciario-Cuatemario	Neógeno-Cuatemario		C
1540	Areniscas	Baja	Mesozoico	Cretácico		C
1541	Calizas y dolomías	Muy alta	Mesozoico	Cretácico		C
1542	Margas	Muy baja	Mesozoico	Cretácico		B
1543	Calizas, margas y calcarenitas	Media	Mesozoico	Cretácico		C
618	Coladas, conos de tefra y pirocl. Dip.bált.-traquibasált. (basanit.-tefrit.) con col.f	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Fuerteventura, Lanzarote, La Palma, Hierro	C
619	Coladas, conos de tefra y pirocl. Dip.bált.-traquibasált. (basanit.-tefrit.-fonol.)	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	Lanzarote, Tenerife, La Palma, Hierro	C
620	Sienitas alcalinas	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	D
621	Tobas ignimbríticas y coladas riolitico-traquíticas. Diques sálicos en más del 65%	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	D
622	Tobas ignimbríticas y coladas riolitico-traquíticas. Diques sálicos entre 10-65%	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
623	Tobas ignimbríticas y coladas riolitico-traquíticas. Diques sálicos subordinados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
624	Brecha polimíctica y heterométrica	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
625	Coladas riolíticas y traquíticas con fonolitas subord. Tobas y brechas ignimbríticas pe	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	D
626	Coladas e ignimbr. fonolíticas. Intrusivos fonolíticos y coladas piroclásticas. Ash&pumi	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	D

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
627	Conglomerados y arenas aluviales. Facies de conglomerados y arenas marinas subordinados	Alta	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	D
628	Coladas (y piroclastos) basálticas, basaníticas y tefríticas	Media	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
629	Coladas basálticas alternando con brechas polimícticas soldadas	Media	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
630	Brecha polimíctica y heterométrica soldada	Media	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
631	Brecha caóticas de deslizamiento, con matriz arcill.-aren. Y materiales epiclásticos s	Media	Cenozoico	Neógeno	Gran Canaria	C
632	Coladas y conos de tefra basan., nefelin. Y tefríticas. Basaltos subordinados	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Gran Canaria	B
633	Coladas y conos de tefra basan., nefelin. Y tefríticas. Basaltos subordinados	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Gran Canaria	B
634	Coladas y conos de tefra basaníticos, tefríticos y tefritico-fonolíticos	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	Gran Canaria	B
601	Lavas y pirocl.basált. (en parte subm.) con sedimentos de fondo oceánico (detr. Y carb.)	Muy baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Neógeno	Fuerteventura, Gomera	B
602	Wehrlitas, piroxenitas, gabros, ijolitas y sienitas, subordinadas. Intrusivos sálicos i	Muy baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Neógeno	Fuerteventura	B
603	Wehrlitas, piroxenitas y gabros	Muy baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Neógeno	Fuerteventura, Gomera	B
604	Coladas basálticas submarinas, domos-coladas sálicos, gabros	Muy baja	Mesozoico-Cenozoico	Cretácico-Neógeno	La Palma	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
605	Coladas basálticas y brechas polimícticas con intensa malla de diques	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife	C
606	Intrusiones subvolcánicas de diques	Muy baja	Cenozoico	Paleógeno-Neógeno	Fuerteventura	C
607	Gabros, leucogabros, sienitas, con tobas y brechas sálicas subordinadas. Intrusivos tra	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura	C
608	Coladas, conos de tefra y piroclastos de dispersión basált. Frecuentes diques básicos	Baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura	C
609	Coladas, conos de tefra basált. Y brechas lit. polimic.heterometr. Pocos diques. Intr. básic	Baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura, Lanzarote, Gran Canaria	B
610	Coladas y conos de tefra basált. Con coladas traquibasált. Y sedimentos detríticos subor	Baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura, Gran Canaria	B
611	Coladas y piroclastos basált. Intrusivos básicos intercalados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura, Lanzarote	C
612	Coladas basálticas, basaníticas y nefelinótocas, con piroclástos inercal. e intrusiv.b	Baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura, Lanzarote	B
613	Coladas basálticas con piroclastos intercalados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Lanzarote	B
614	Coladas basálticas, con piroclastos intercalados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Lanzarote	B
615	Coladas y conos de tefra basált. Con coladas basaníticas subordin. Y piroclastos de dispe	Media	Cenozoico	Neógeno-Cuatemario	Fuenteventura, Lanzarote	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
616	Arenas y conglomerados aluviales y marinos.	Alta	Cenozoico	Neógeno-Cuatemario	Fuerteventura	D
617	Arenas eólicas subordinadas	Alta	Cenozoico	Neógeno-Cuatemario	Fuerteventura, Lanzarote, Tenerife, La Palma, Hier	C
635	Arenas y conglomerados marinos, fosilíferos	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	Gran Canaria	C
636	Coladas y conos de tefra basaníticos. Piroclastos de dispersión subordinados	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	Gran Canaria	C
637	Conos de tefra basálticos	Media	Cenozoico	Neógeno	Tenerife	B
638	Coladas basálticas con niveles piroclásticos subordinados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife	B
639	Coladas de composición intermedia y fonolitas máficas. Brechas domos subordinados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife	C
640	Coladas y conos de tefra basált. (basan. Y traquibas.)Intrusiv. básicos y sálicos, y brec	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife, Gomera	B
641	Coladas basálticas, traquibasálticas y fonolíticas. Puroclastos sálicos subordinados	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife	C
642	Coladas e ignimbr. traquíticas y fonolíticas. Coladas basálticas y traquibasálticas subo	Baja	Cenozoico	Neógeno-Cuatemario	Tenerife	D
643	Coladas basálticas, traquibasálticas y fonolíticas.	Baja	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	B

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
644	Coladas y piroclastos basálticos. Diques básicos en la parte inferior	Baja	Cenozoico	Neógeno-Cuatemario	Tenerife	C
645	Coladas y piroclastos basálticos. Intrusivos sálicos subordinados	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
646	Coladas, aglutinados, pumitas e ignimbrits fonolíticas	Baja	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
647	Tobas sálicas, coladas fonolíticas e ignimbritas no consolidadas	Media	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
648	Piroclastos sálicos indiferenciados	Media	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	B
649	Coladas basálticas y traquibasálticas, con conos de tefra subordinados	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	B
650	Coladas basálticas y traquibasálticas	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
651	Domos y coladas fonoliticas, Piroclastos de Caida, sálicos, subordinados	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
652	Coladas básicas, traquibasálticas y traquifonolíticas	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
653	Coladas, conos y domos fonolíticos. Coladas y conos basálticos subordinados	Alta	Cenozoico	Cuatemario	Tenerife	C
654	Coladas y conos de tefra basálticos. Domos sálicos y brechas líticas basálticas, subord	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife	C
655	Coladas y con. De tefra basált., atrevesados por diques, altern.con brechas, o con intr	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife, Gomera	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
656	Intrusiones filonianas sálicas, sienitas y pitones fonolíticos. Depósitos pirocl.sálico	Muy baja	Cenozoico	Neógeno	Gomera	C
657	Depósitos de brechas y tobas, polimícticos y poligénicos, preferentemente sálicos	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gomera	C
658	Coladas y con.tefra basált.y traquib. Traquitas, basált.e intrusiv. sálicos y básicos sub	Baja	Cenozoico	Neógeno	Tenerife, Gomera	C
659	Intrusivos traquíticos y fonolíticos	Baja	Cenozoico	Neógeno	Gomera	D
660	Coladas y piroclastos basálticos, con intrusivos basálticos subordinados	Muy alta	Cenozoico	Neógeno	Gomera	C
661	Coladas y piroclastos basálticos, con muchos diques básicos. Sediment. Y brechas subordi	Baja	Cenozoico	Neógeno-Cuatemario	La Palma	C
662	Coladas y conos de tefra basálticos y, a veces basaníticos y tefríticos	Baja	Cenozoico	Cuatemario	Hierro, La Palma	C
663	Coladas y pirocl. Basált. (Basan. y tefr.) con intrusiv. Básicos, y coladas tefríticas tar	Baja	Cenozoico	Cuatemario	Hierro, La Palma	C
664	Coladas y conos de tefra, basálticos y tefríticos	Media	Cenozoico	Cuatemario	Hierro	C
665	Coladas y conos de tefra basálticos, tefríticos y fonolíticos	Media	Cenozoico	Cuatemario	La Palma	C

(Continuación)

Código formac.	Descripción litológica	Permeabil.	Era	Sistema	Zona	Parám. térmico
666	Coladas y conos de tefra basálticos, traquibasálticos, basaníticos y tefríticos	Baja	Cenozoico	Cuatemario	Hierro	C
667	Coladas y con. De tefra basálticos, traquibasálticos, basaníticos y tefríticos, con col	Baja	Cenozoico	Cuatemario	Hierro	C
668	Coladas y conos de tefra basálticos y, subor., basaníticos, tefríticos y fonolíticos	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	La Palma	C
669	Arenas eólicas sueltas	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	Fuerteventura, Lanzarote, Gran Canaria	D
670	Depósitos detríticos aluviales, de vertiente (Incluídos epiclásticos y gravitacionales)	Muy alta	Cenozoico	Cuatemario	Fuerteventura, Lanzarote, Gran Canaria, Tenerife	D
671	Intrusivos y coladas cuarzotraquíticas	Baja	Cenozoico	Neógeno	Fuerteventura	D

Valores del Parámetro Térmico: A: <25W/m - B: 35-50W/m - C: 40-60W/m - D: 60-80W/m - E: >80W/m

Durante este procedimiento, el mapa de unidades litológicas de España queda transformado en un *Mapa de Potencia Térmica Superficial*, que puede ser utilizado en primera aproximación para el diseño preliminar de sistemas de aprovechamiento geotérmicos de muy baja temperatura. Este mapa, desglosado por CC AA, se presenta en las Figuras 7.1 a 7.17.

En cualquier parte de la geografía de España, si se desea aprovechar la energía geotérmica contenida en las capas más someras del subsuelo, se puede llevar a cabo una estimación del número y profundidad de sondeos necesarios en función de la potencia térmica total necesaria (vatios) y el valor de la potencia térmica superficial asignada a ese punto en el mapa elaborado (vatios/m). Caso de llevarse a cabo la operación, será necesario, en el primer sondeo que se realice, llevar a cabo un ensayo de respuesta térmica, para concretar con más seguridad el dato de capacidad térmica de los terrenos y diseñar definitivamente las instalaciones.

7.2.2 Recursos de muy baja temperatura contenidos en los acuíferos explotables con bomba de calor

Los sistemas abiertos, como se describe en el apartado 5.2.3.1, se caracterizan porque el portador de calor –el agua subterránea– fluye en el subsuelo y actúa tanto como fuente de calor, como de medio para el intercambio del mismo. El principal aspecto técnico de estos sistemas es el que concierne a los sondeos que es necesario perforar para extraer y devolver al acuífero el agua en él contenida.

El agua subterránea es extraída del acuífero mediante bomba sumergida, y enviada a la bomba de

calor, donde cede o absorbe la energía que se vierte o extrae del recinto climatizado.

Para definir la viabilidad económica de un sistema abierto de utilización de calor del subsuelo, es necesario disponer con la mayor precisión posible al menos los siguientes datos: profundidad del acuífero, caudal extraíble o explotable, temperatura y caudal del agua. Otros parámetros complementarios que puede ser útil conocer son la transmisividad y el espesor del acuífero, que permiten estimar el caudal explorable, así como la profundidad del nivel estático del agua en el punto de estudio.

No siempre es posible conocer los datos mencionados por lo que en la mayor parte de los casos solo algunos de ellos se conocen y hay que llevar a cabo alguna acción prospectiva para la determinación de la información complementaria.

En el presente informe se ha analizado la información hidrogeológica general disponible en el IGME, sin entrar en estudios hidrogeológicos de detalle de los acuíferos, lo que sería una labor muy extensa y compleja, no contemplada en el objetivo de este proyecto.

La información básica consultada, se concreta en tres informes realizados por el IGME: *Síntesis de almacenes de muy baja entalpía* incluido en el proyecto "*Investigación Geotérmica dentro del Programa 243. Otras fuentes de Energía*" año 1984, *Las aguas subterráneas en España* (IGME 1990) y *Unidades hidrogeológicas de España*. Mapas y Datos básicos (ITGE 2000).

Figura 7.1. Mapa de potencia térmica superficial de Andalucía

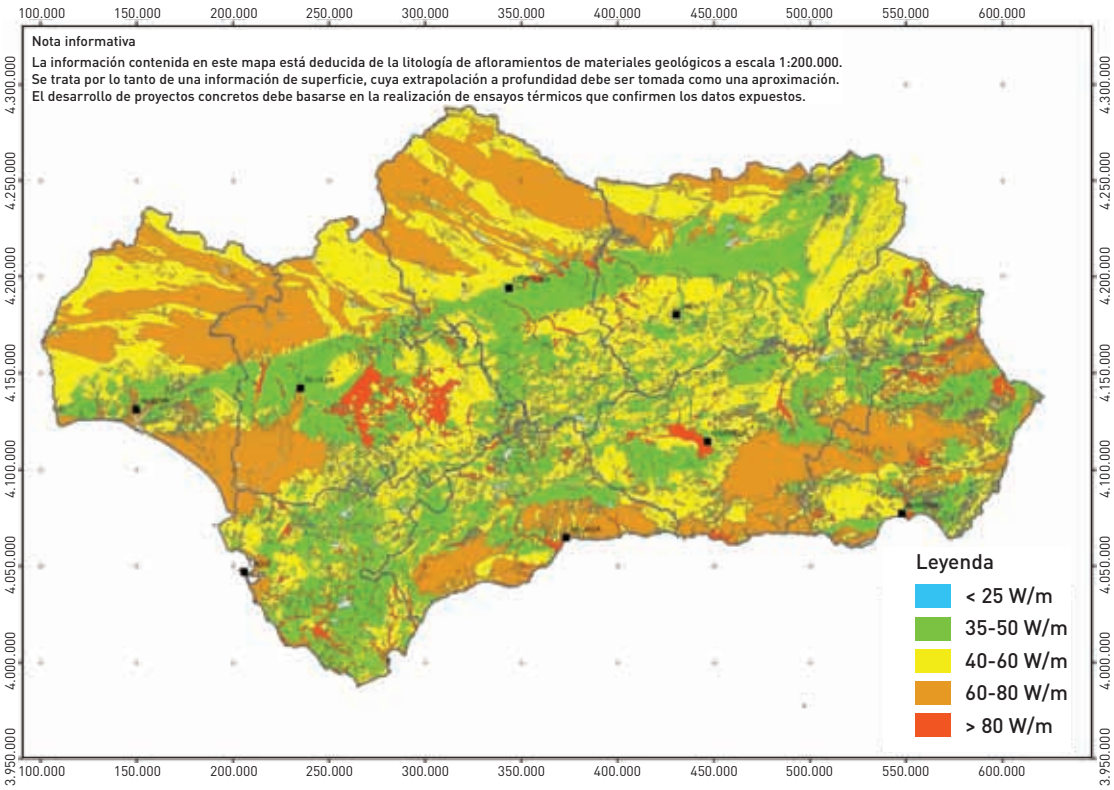


Figura 7.2. Mapa de potencia térmica superficial de Aragón

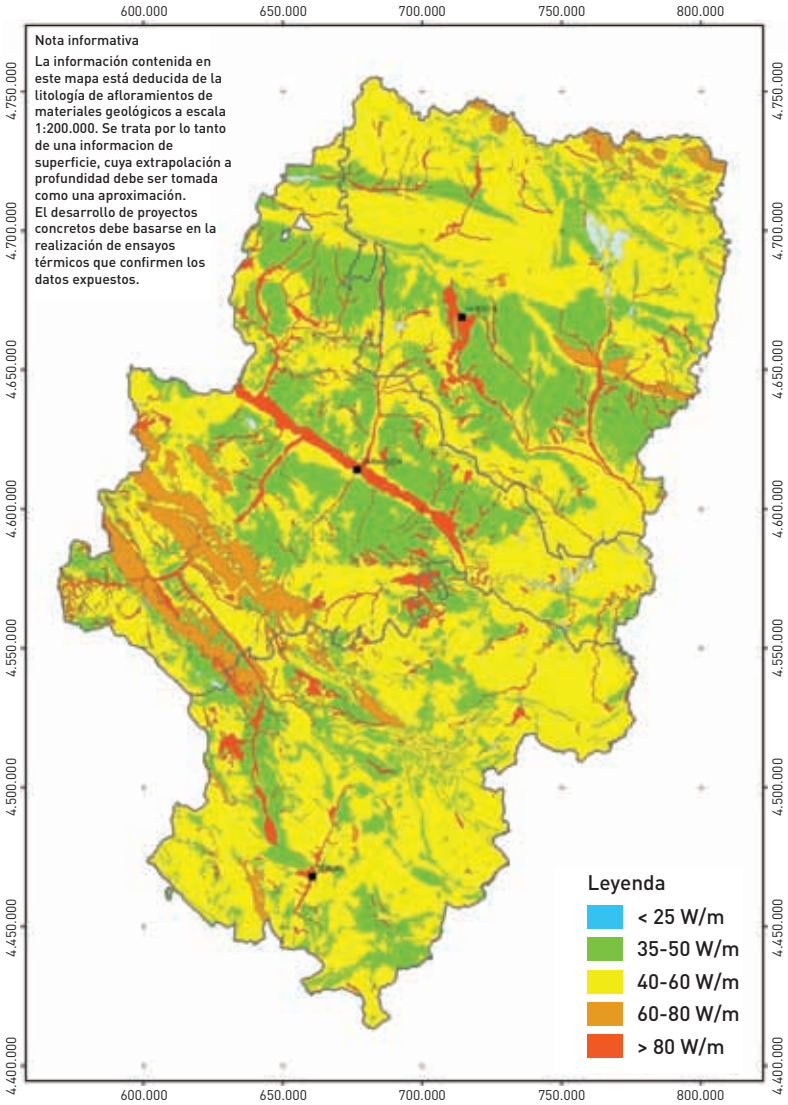


Figura 7.3. Mapa de potencia térmica superficial del Principado de Asturias

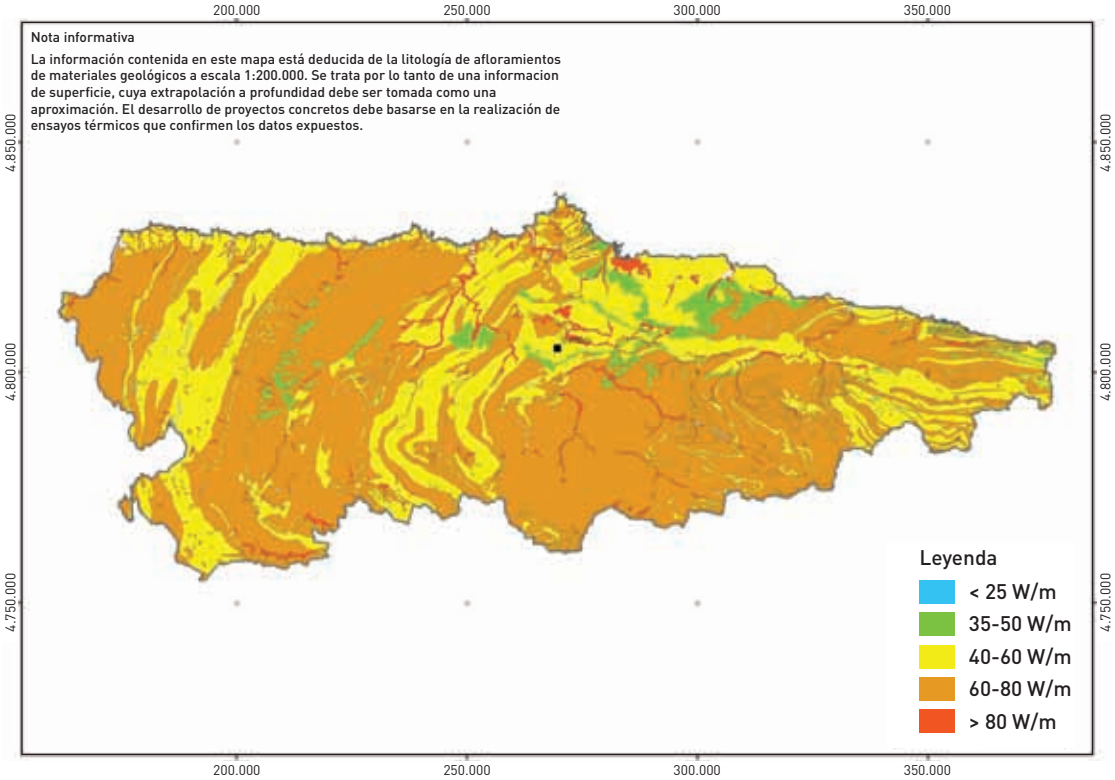


Figura 7.4. Mapa de potencia pérmica superficial de Illes Balears

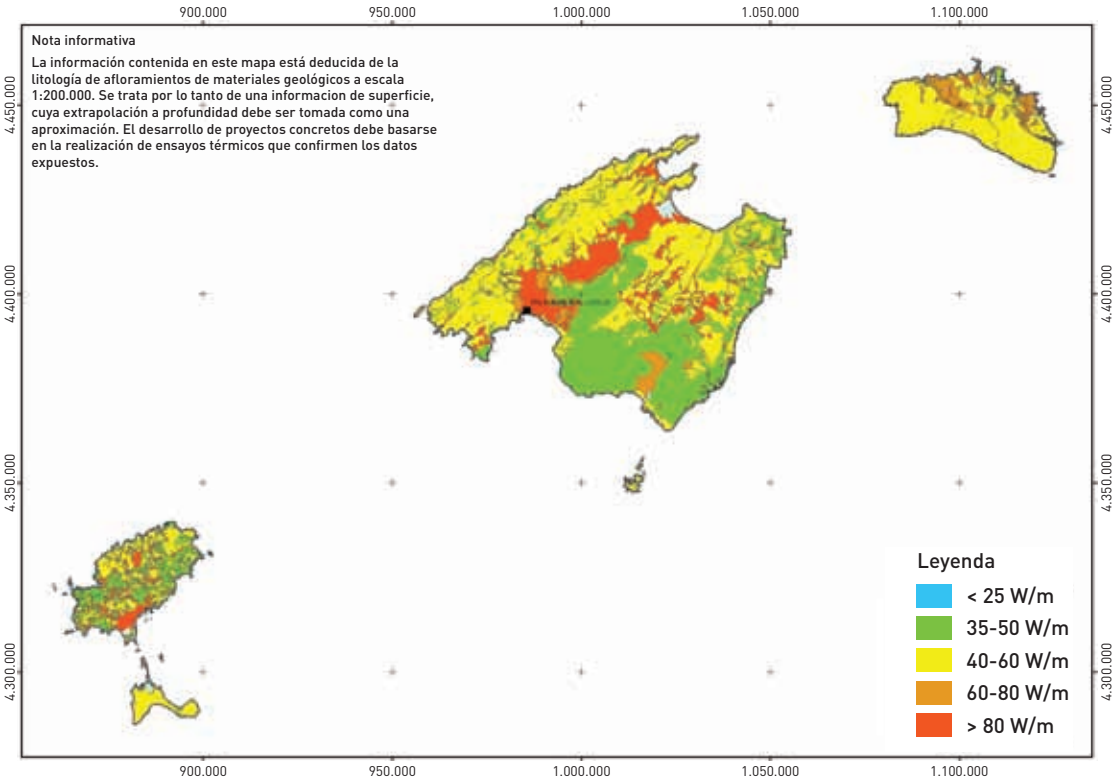


Figura 7.5. Mapa de potencia pérmica superficial de las Islas Canarias

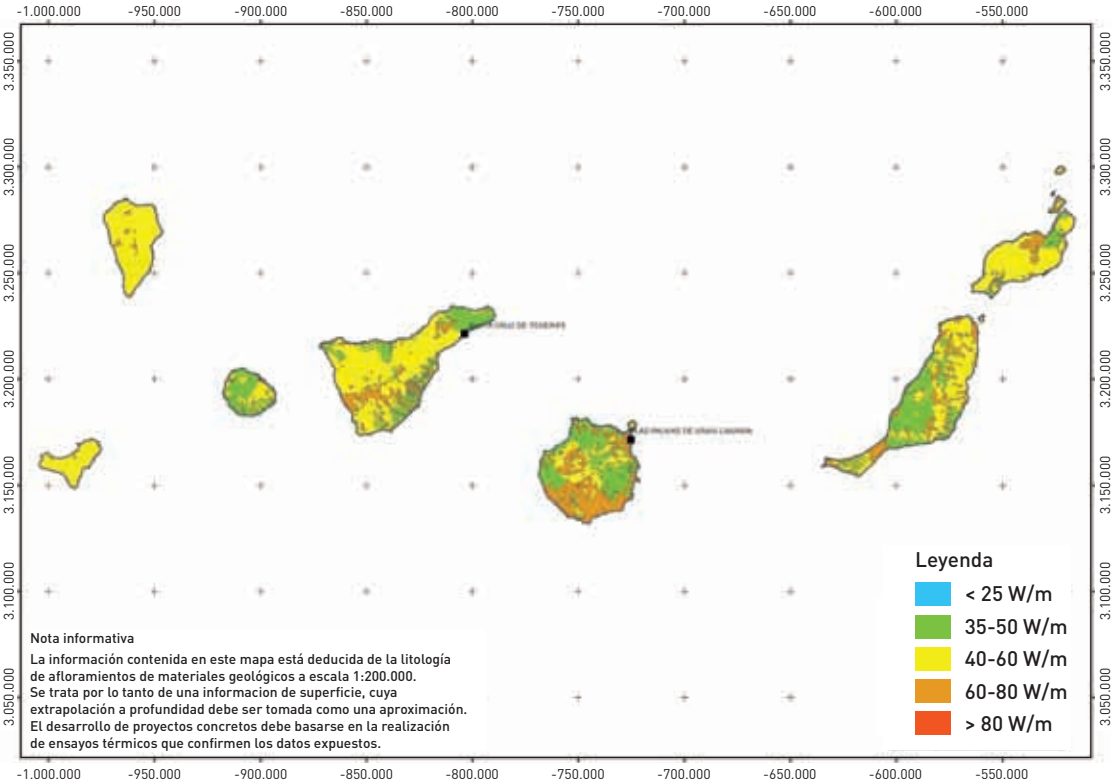


Figura 7.6. Mapa de potencia térmica superficial de Cantabria

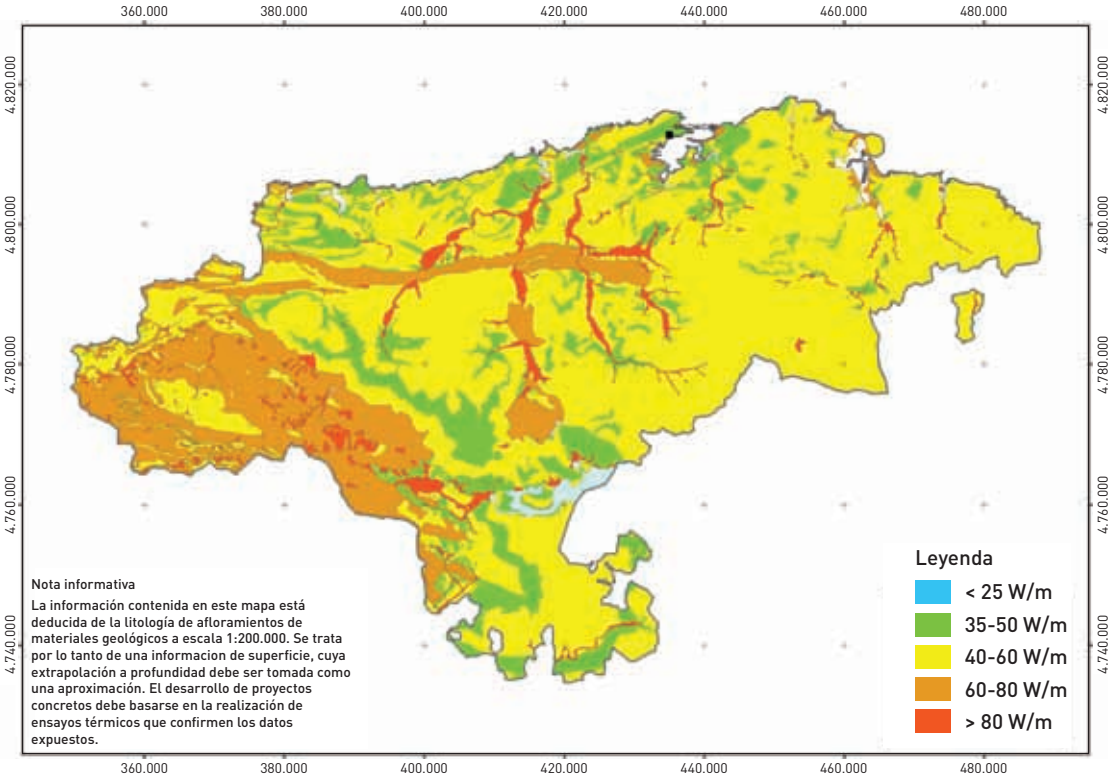


Figura 7.7. Mapa de potencia térmica superficial de Castilla y León

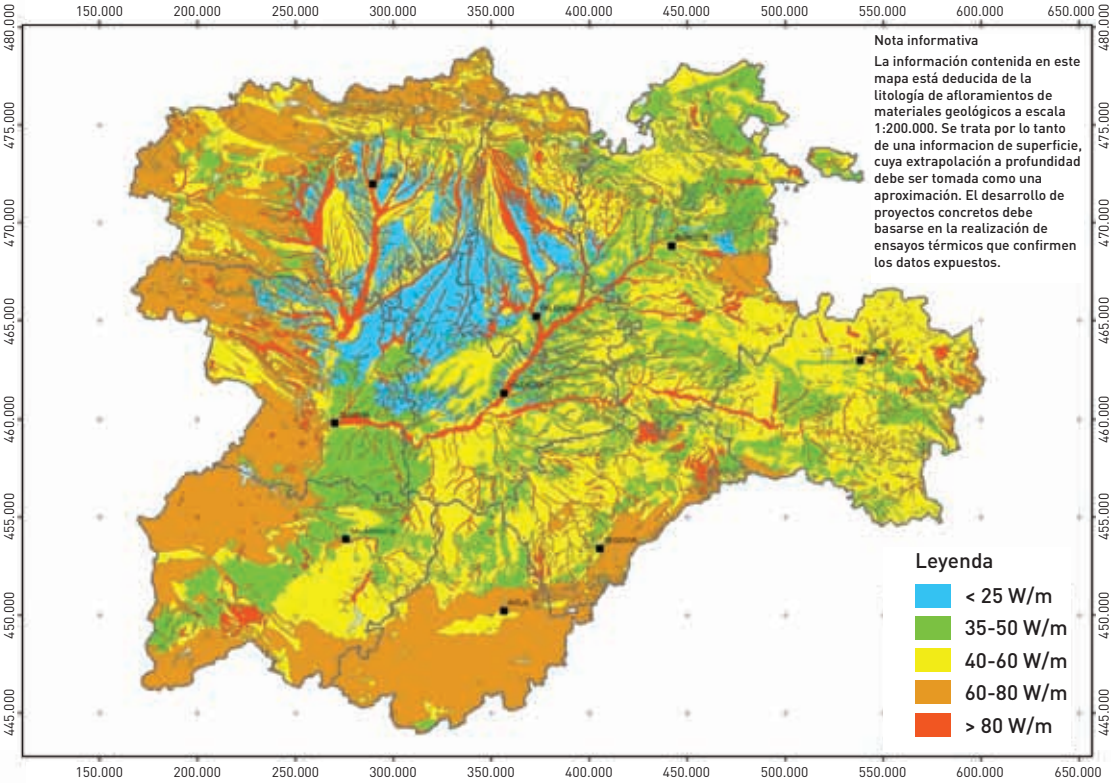


Figura 7.8. Mapa de potencia térmica superficial de Castilla-La Mancha

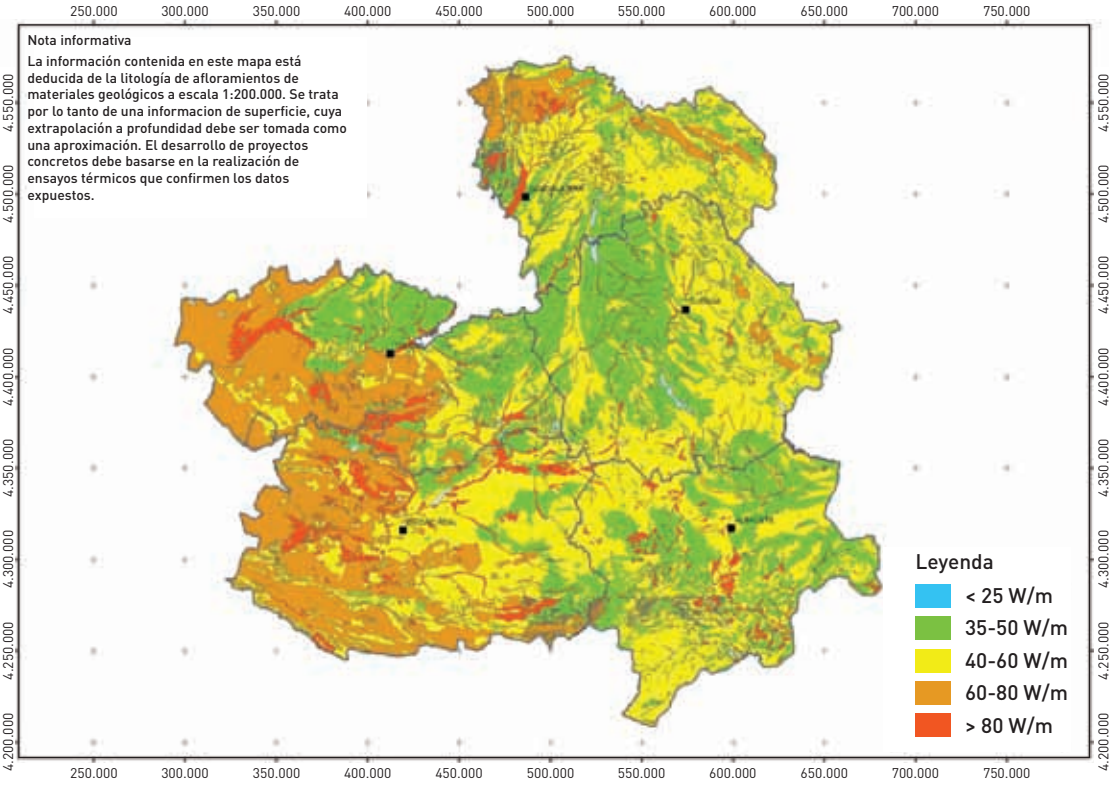


Figura 7.9. Mapa de potencia térmica superficial de Cataluña

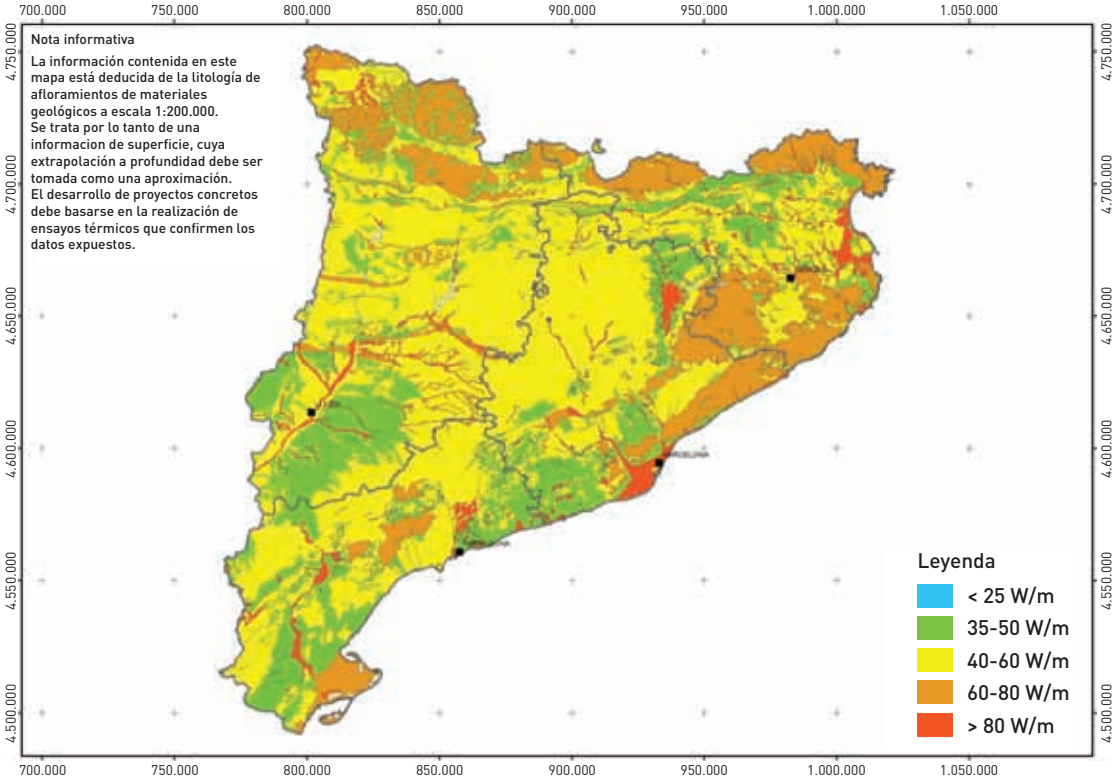


Figura 7.10. Mapa de potencia térmica superficial de la Comunitat Valenciana

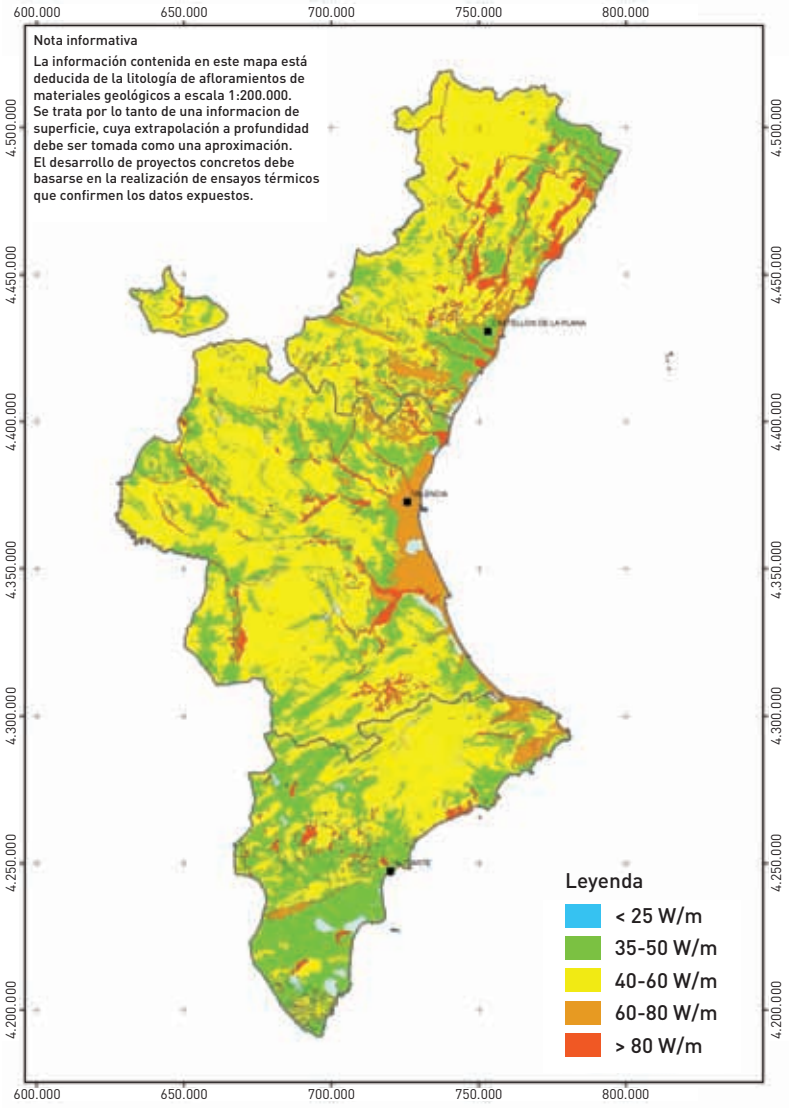


Figura 7.11. Mapa de potencia térmica superficial de Extremadura

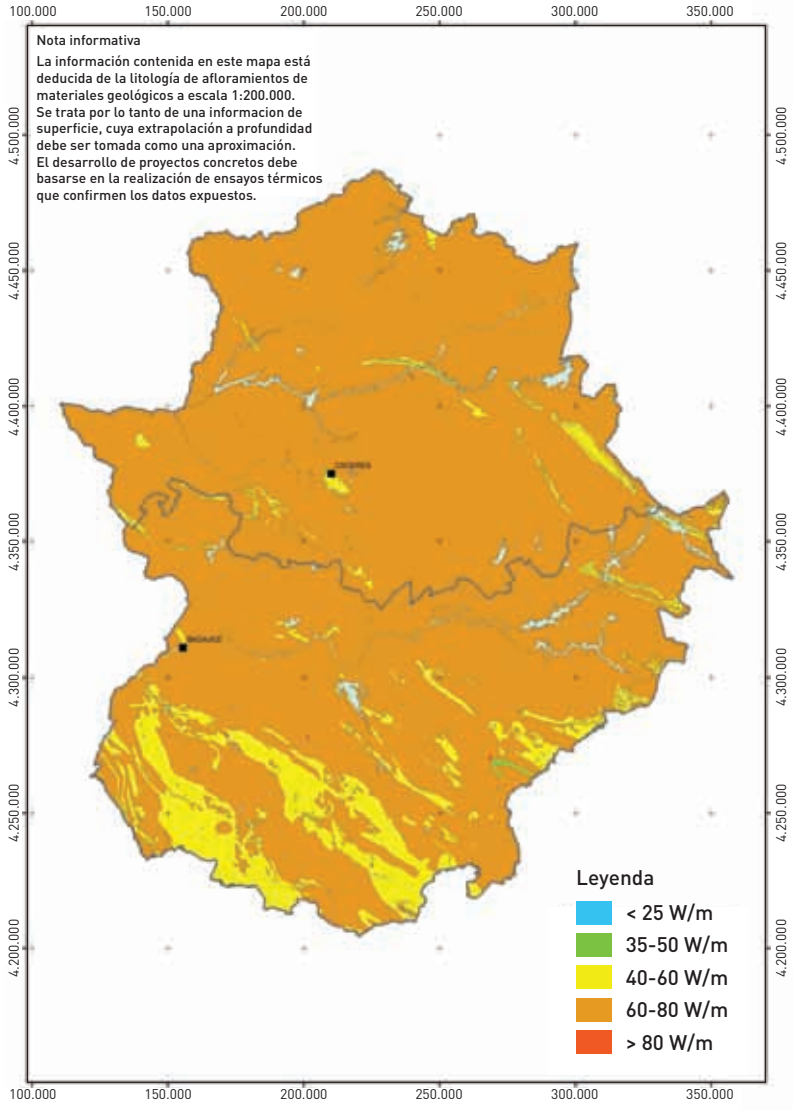


Figura 7.12. Mapa de potencia térmica superficial de Galicia

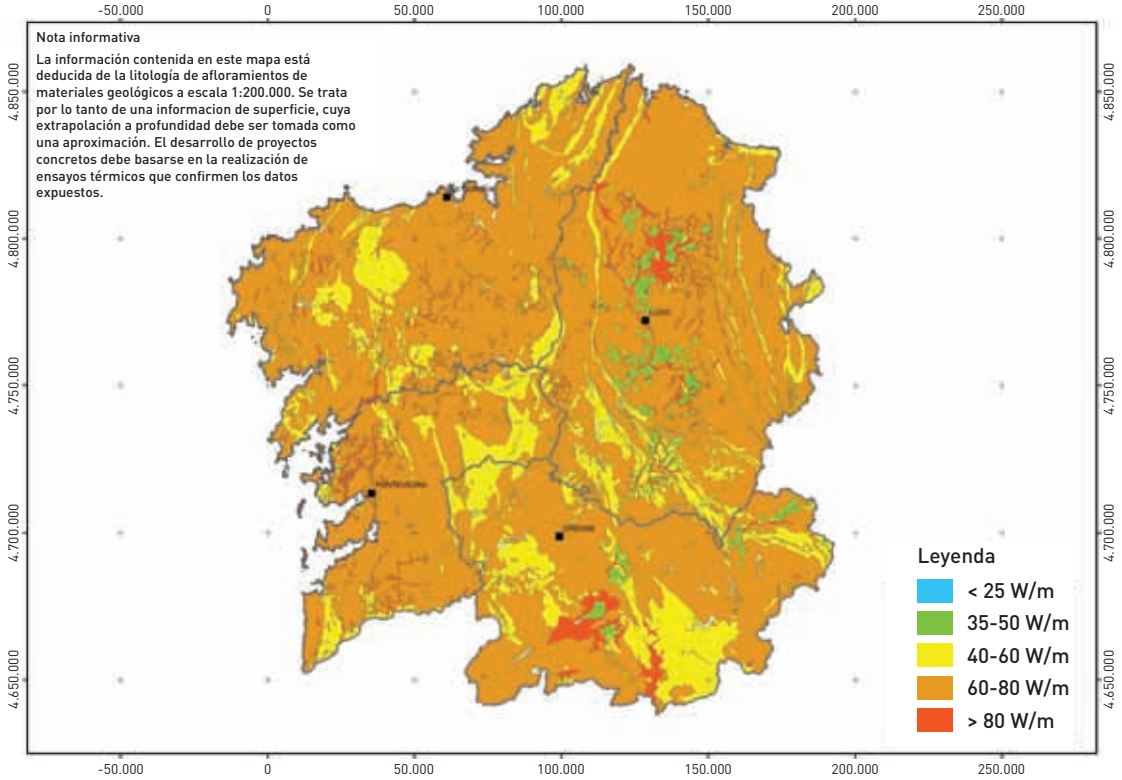


Figura 7.13. Mapa de potencia térmica superficial de la Comunidad de Madrid

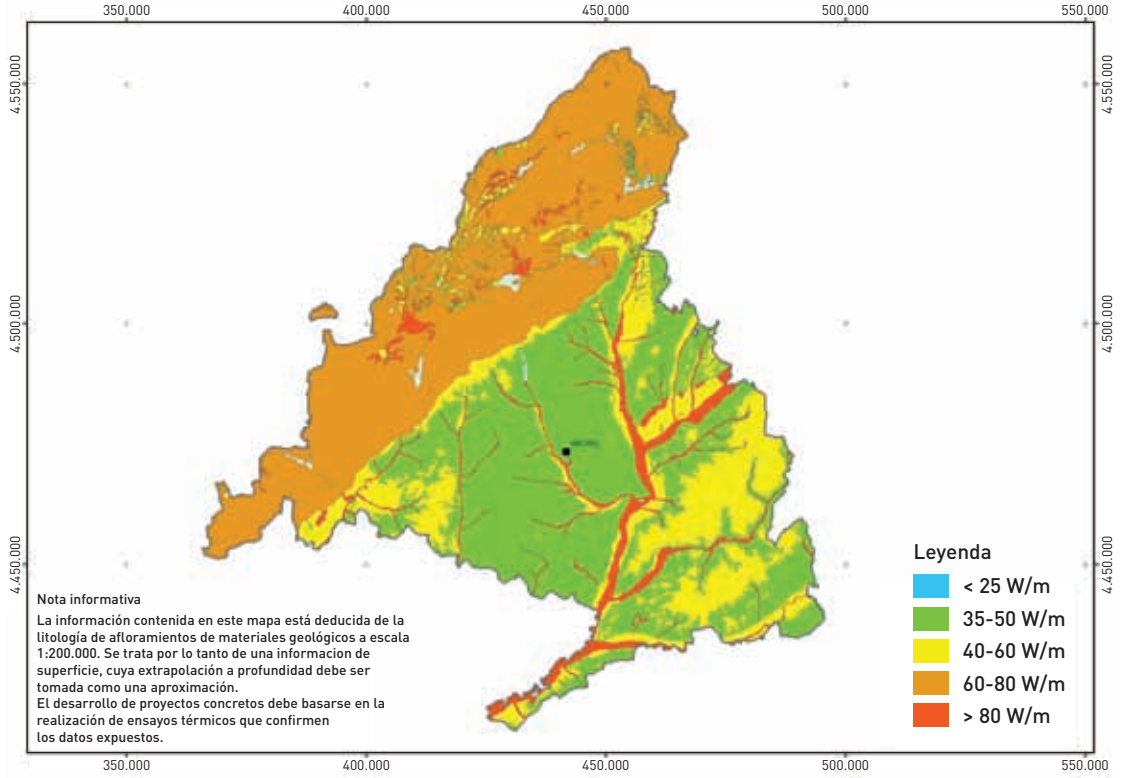


Figura 7.14. Mapa de potencia pérmica superficial de la Región de Murcia

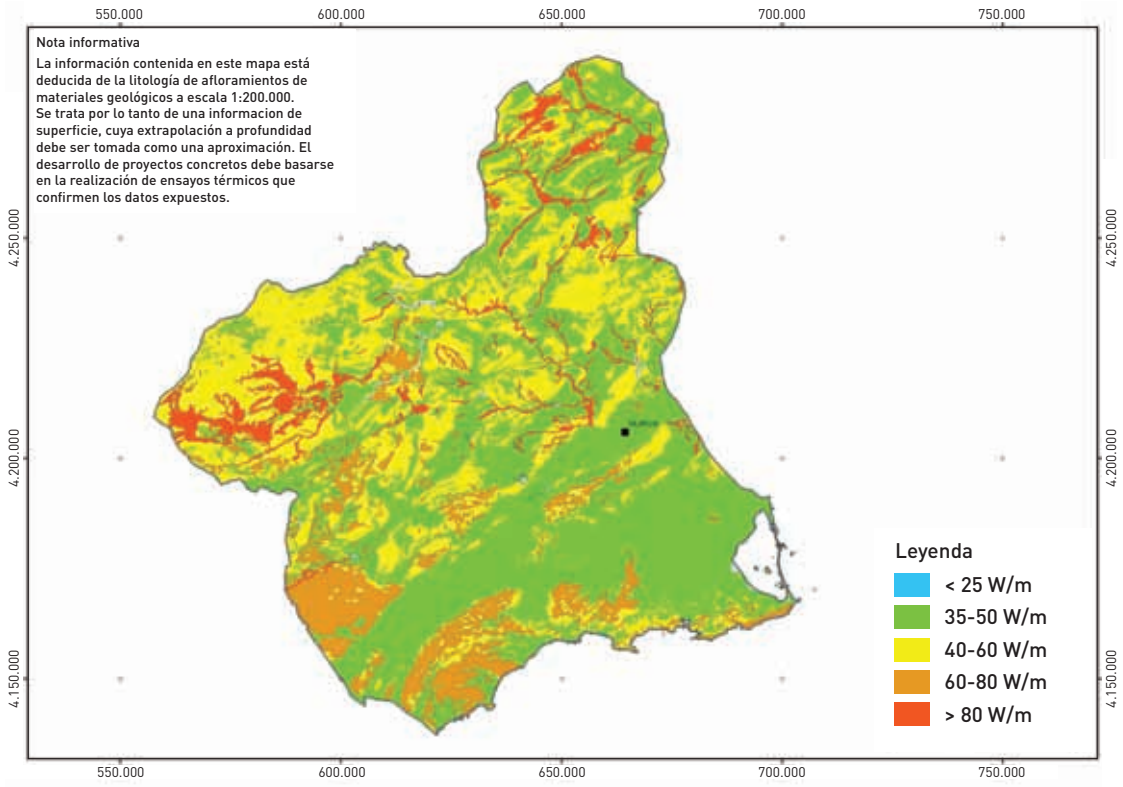


Figura 7.15. Mapa de potencia térmica superficial de la Comunidad Foral de Navarra

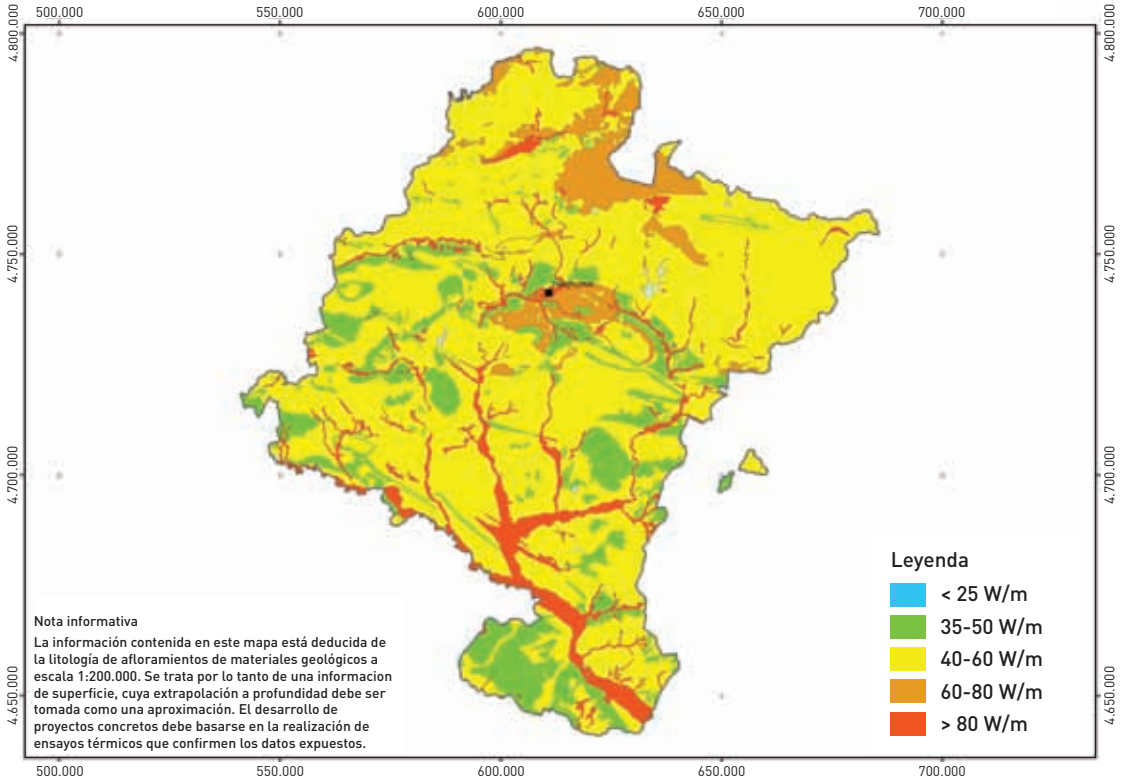


Figura 7.16. Mapa de potencia térmica superficial del País Vasco

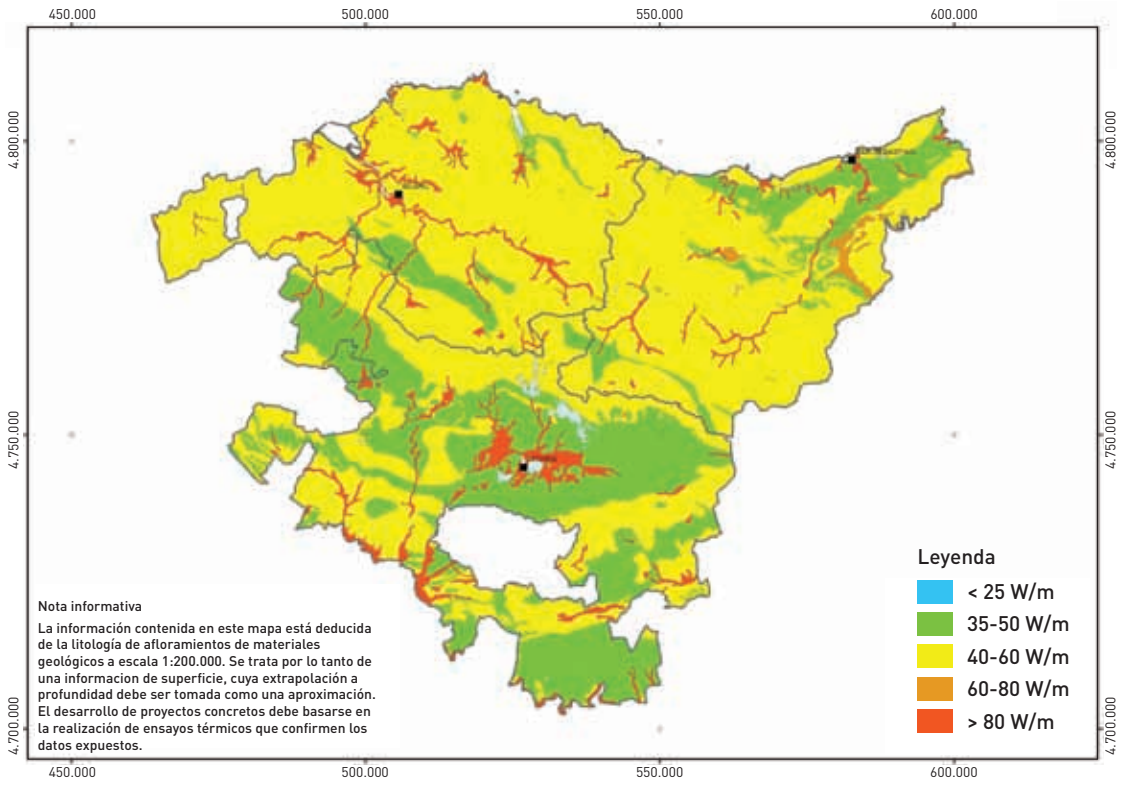
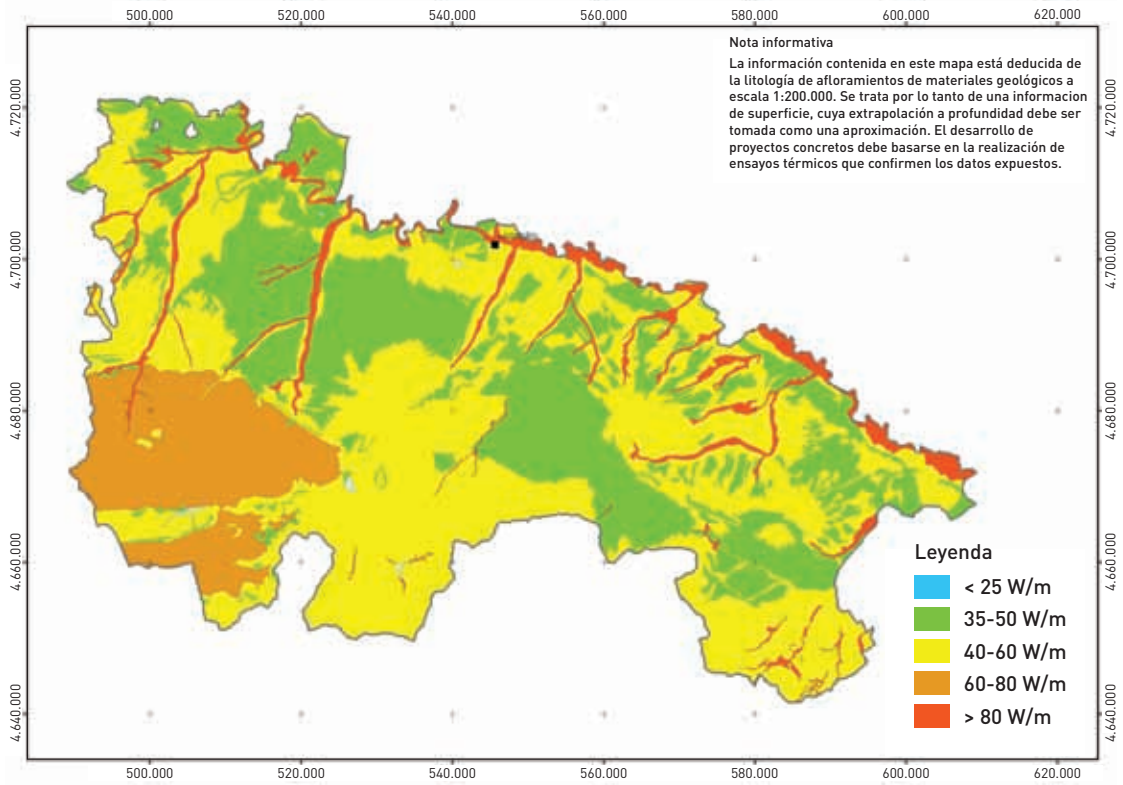


Figura 7.17. Mapa de potencia térmica superficial de La Rioja



En las tablas 7.4 a 7.19 se presenta por Comunidades Autónomas la información deducida para cada unidad hidrogeológica, de las definidas en el último de los informes referenciados. No se han incluido las U.H. de las que no se dispone de datos en los citados informes. Se ha tomado como base divisoria esta unidad hidrogeológica, en lugar de las actuales masas de aguas subterráneas, por considerar que las primeras tienen un carácter más técnico y geológico que las segundas en las que predominan los aspectos administrativos. Estas tablas se complementan con los mapas presentados en las Figuras 7.18 a 7.33 en las que se representan los límites de las unidades hidrogeológicas de cada Comunidad Autónoma.

Se advierte la ausencia en estas tablas y mapas de las correspondientes a las Islas Canarias cuyas Unidades Hidrogeológicas no fueron definidas en el documento anteriormente referenciado, careciéndose de la división equivalente. A este respecto es preciso puntualizar que en las Islas Canarias, en general, las posibilidades de explotación de acuíferos con bomba de calor, en el sentido contemplado en este apartado, son muy escasas, debido a la gran profundidad a que se encuentra habitualmente el nivel de agua subterránea. La única excepción a esta generalización es una franja costera, estrecha y limitada en las zonas en que el relieve se mantiene bajo, pero con el inconveniente del elevado contenido en sales de las aguas subterráneas muy próximas a la costa.

7.3 RECURSOS GEOTÉRMICOS DE BAJA TEMPERATURA

7.3.1 Introducción

Como se expone en el apartado 5.1.4, ese tipo de recurso, cuyo rango de temperatura es de 30 a 100 ºC, se localiza habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal –25 a 35 ºC/km– a profundidades de 1.500 a 2.500 metros, mientras que en zonas con gradiente geotérmico mayor a profundidades que pueden ser menores de 1.000 metros. La única condición geológica para su existencia, es la presencia a la profundidad adecuada –en función del gradiente geotérmico– de formaciones geológicas permeables –arenas, areniscas, conglomerado, calizas, dolomías, etc.– que permitan el almacenamiento y circulación de agua. Estas formaciones permeables pueden estar constituidas por áreas de fracturas y fisuras de rocas duras (metamórficas, sedimentarias o ígneas).

La constitución geológica de la Península Ibérica permite la existencia generalizada de formaciones permeables profundas y por lo tanto de recursos geotérmicos de baja temperatura. Incluso el extenso Macizo Hercínico del oeste peninsular, permite localmente la presencia de estos recursos debido a la abundante fracturación y fisuración de sus materiales.

La utilización de los recursos de baja temperatura se centra en el uso directo del calor, especialmente en la climatización de recintos: residenciales, agrícolas o industriales. Debido a la circulación profunda de los fluidos, suelen presentar salinidades importantes, lo que impiden utilizarlos directamente en los elementos o instalaciones de climatización. Lo más habitual es emplear un intercambiador principal en el que el fluido geotérmico cede su calor a otro fluido secundario que se utiliza ya directamente en las instalaciones de aprovechamiento. Este intercambiador principal generalmente de placas está fabricado en aleaciones de titanio.

Por su ubicación geológica, los recursos geotérmicos de baja temperatura existentes en España se clasifican en dos tipos: recursos geotérmicos situados en grandes cuencas sedimentarias y recursos geotérmicos situados en zonas de cordilleras y depresiones internas de las mismas, agrupadas en este informe como "otras zonas". Dentro de este segundo grupo de recursos se incluyen las áreas, de limitada extensión geográfica, pertenecientes al Macizo Hercínico, que contienen recursos gracias a su fracturación y fisuración. A continuación se describen los recursos geotérmicos de baja temperatura de cada uno de estos dos grandes grupos.

Tabla 7.4. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Andalucía para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
04.12	Ayamonte-Huelva	Detrítico	<80	17-18	<50	100-4.000
04.13	Niebla-Posadas	Detrítico	10-20	16-18	50-80	500-3.000
04.14	Almonte-Marismas	Detrítico	15-150	17-19	10-100	600-3.000
05.01	Sierra de Cazorla	Carbonatado	<500	14-17	<30	<1.000
05.02	Quesada-Castril	Carbonatado	<500	14-17	<30	<1.000
05.03	Duda-La Sagra	Carbonatado	<200	14-16	<30	<1.000
05.04	Huéscar-Puebla de Don Fadrique	Carbonatado	<200	14-16	<30	<1.000
05.05	La Zarza	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000
05.06	Orce-María	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000
05.07	Cúllar-Baza	Detrítico	<50	16-18	<25	1.000-3.000
05.09	Baza-Caniles	Detrítico	20-500	15-18	--	500-5.000
05.10	Jabalcón	Carbonatado	50-200	14-17	<50	<1.000
05.11	Sierra de Baza	Carbonatado	<500	14-17	--	--
05.12	Guadix-Marquesado	Carbonatado	80-300	15-18	--	1.000-3.000
05.13	El Mencal	Carbonatado	50-200	14-17	<50	<1.000
05.14	Bedmar-Jódar	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.15	Torres-Jimena	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.16	Jabalcuz	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.17	Jaén	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.18	S. Cristóbal	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.19	Mancha Real-Pegalajar	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.20	Almadén-Carluca	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
05.21	Sierra Magina	Carbonatado	150-500	14-17	<50	<1.500
05.22	Mentidero-Montesinos	Carbonatado	200-300	14-17	<50	<1.000
05.23	Úbeda	Detrítico	<50	16-18	<15	1.000-3.000
05.24	Bailén-Guarromán	Detrítico	<50	15-18	10-15	1.000-3.000
05.25	Rumblar	Detrítico	<30	16-18	<15	1.000-3.000
05.26	Aluvial del Guadalquivir (Córdoba-Jaén)	Detrítico	5-30	16-18	20-50	600-1.000
05.27	Porcuna	Detrítico	0-20	16-18	<15	1.000-3.000
05.28	Mtes. Orientales Norte	Carbonatado	100-300	14-17	<50	<1.000
05.29	Sierra Colomera	Carbonatado	--	14-18	--	--
05.30	Sierra Arana	Carbonatado	50-200	14-17	<50	--
05.31	Padul-La Peza	Carbonatado	20-200	14-17	--	--
05.32	Depresión de Granada	Detrítico	<250	15-18	--	400-4.000
05.33	Sierra Elvira	Carbonatado	30-100	15-25	--	--
05.34	Madrid-Parapanda	Carbonatado	100-600	14-17	--	--
05.35	Sierra Cabra-Baena	Carbonatado	--	14-17	<50	--
05.36	Rute-Horconera	Carbonatado	--	14-17	<50	--
05.37	Albayate-Chanzas	Carbonatado	--	14-17	<50	--
05.39	Hacho de Loja	Carbonatado	20-100	14-18	--	<1.000
05.40	Sierra Gorda-Zafarraya	Carbonatado	100-500	13-20	--	--
05.41	Chotos-Cortijo Hidalgo	Carbonatado	100-300	14-16	<50	<1.000
05.42	Tejeda-Almijara-Las Guájaras	Carbonatado	50-200	14-17	--	<1.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
05.43	Sierra y Mioceno de Estepa	Detrítico y Carbonatado	20-200	14-18	--	600-3.000
05.44	Altiplanos de Écija	Detrítico	15	14-18	15-25	1.000-3.000
05.45	Sierra Morena	Carbonatado	<100	14-18	<30	<1.000
05.46	Aluvial Guadalquivir (Sevilla)	Detrítico	5-30	16-18	20-50	600-3.000
05.47	Sevilla-Carmona	Detrítico	10-40	18-20	5-30	1.000-3.000
05.48	Arahal-Coroníl-Morón-Puebla Cazalla	Detrítico	5-55	14-18	5-30	600-7.000
05.49	Niebla-Posadas	Detrítico	10-20	16-18	50-80	500-3.000
05.50	Aljarafe	Detrítico	15-100	17-19	--	600-3.000
05.51	Almonte-Marismas	Detrítico	15-150	17-19	10-100	600-3.000
05.52	Lebrija	Detrítico	10-150	17-20	5-50	900-4.000
05.53	Llanos de Villamartín	Detrítico	8-80	15-17	1-7	600-2.000
05.54	Arcos-Bornos-Espera	Detrítico	80	15-17	10-80	200-5.000
05.55	Aluvial Guadalete	Detrítico	10-100	17-20	--	300-10.000
05.56	Jerez de la Frontera	Detrítico	10-150	17-20	5-20	300-15.000
05.57	Rota-Sanlúcar-Chipiona	Detrítico	5-30	17-20	10-20	200-10.000
05.58	Puerto de Santa María	Detrítico	5-30	17-20	10-20	500-10.000
05.59	Puerto Real-Conil	Detrítico	5-50	17-20	10-20	300-2.000
05.60	Sierras de las Cabras	Carbonatado	200	15-17	>20	500-1.500
05.61	Vejer-Barbate	Detrítico	20-130	17-20	5-50	200-3.000
05.62	Aluvial Barbate	Detrítico	10-100	17-20	--	200-1.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
05.63	Setenil-Ronda	Detrítico	<400	15-17	10-30	200-3.000
05.64	Sierra Grazalema	Carbonatado	200-600	15-17	5-200	500-3.000
05.66	Sierra de Cañete	Carbonatado	--	14-17	--	--
05.67	Sierra de Líbar	Carbonatado	300-700	15-17	<300	<1.000
06.01	El Saltador	Detrítico	<500	17-18	--	<3.000
06.03	Alto Almanzora	Detrítico	50-100	15-17	--	--
06.04	Huercal-Overa	Detrítico	90-100	18-20	--	3.000
06.06	Bajo Almanzora	Detrítico	5-50	16-19	--	--
06.07	Bedar-Alcornia	Detrítico	100-300	18-20	--	--
06.08	Alto Aguas	Detrítico	100-300	20-36	10-80	1.000-3.000
06.09	Campo de Tabernas-Gergal	Detrítico	50-200	15-18	--	--
06.10	Cuenca río Nacimiento	Detrítico	20-100	20-36	10-80	1.000-3.000
06.11	Campos de Níjar	Detrítico	80-200	20-36	10-80	>3.000
06.12	Andarax-Almería	Detrítico	20-40	15-40	--	2.000-7.000
06.13	Sierra de Gádor	Carbonatado	50-200	12-40	40-130	<1.000
06.14	Campo de Dalías	Carbonatado	100-200	19-40	20-200	200-3.000
06.15	Delta del Adra	Detrítico	25-200	16-22	15-100	1.000-5.000
06.17	Sierra de Padul	Carbonatado	20-200	14-17	40-130	<1.000
06.19	Sierra Escalate	Carbonatado	20-200	14-17	--	<1.000
06.20	Carchuna-Castell de Ferro	Detrítico	10-50	16-20	--	600-5.000
06.21	Motril-Salobreña	Detrítico	20-200	18-20	<150	1.000-5.000
06.22	Río Verde	Detrítico	10-50	17-20	--	500-3.000
06.23	Depresión de Padul	Detrítico	5-100	16-18	--	600-3.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
06.24	Tejeda-Almijara-Las Guájaras	Carbonatado	50-200	14-17	--	<1.000
06.25	Sierra Gorda-Zafarraya	Carbonatado	100-500	13-20	--	--
06.27	Vélez	Detrítico	<70	18-20	--	1.000-4.000
06.29	Alfarnate	Carbonatado	100-500	13-17	--	--
06.31	Las Cabras-Camarolos-S. Jorge	Carbonatado	20-200	14-17	--	<1.000
06.32	El Torcal de Antequera	Carbonatado	20-200	14-17	--	<1.000
06.33	Llanos de Antequera-Archidona	Detrítico	20-100	16-20	--	1.000-3.000
06.34	Fuente Piedra	Detrítico	20-100	16-20	--	1.000-3.000
06.35	Sierra Teba	Carbonatado	--	14-17	--	<1.000
06.36	Valle Abdalajís	Detrítico	20-100	14-18	--	--
06.37	Bajo Guadalhorce	Detrítico	<50	18-21	--	1.000-5.000
06.38	Sierra Blanca-Sierra de Mijas	Carbonatado	--	14-18	--	<1.000
06.39	Fuengirola	Detrítico	20-100	18-21	<40	1.500
06.40	Marbella-Estepona	Detrítico	10-100	18-21	10-50	500-1.000
06.41	Sierra de Cañete	Carbonatado	--	14-17	--	--
06.42	Setenil-Ronda	Detrítico	<400	15-17	10-30	200-3.000
06.43	S. Blanquilla-Merinos-Borbolla	Carbonatado	--	13-17	--	--
06.44	Sierra de Líbar	Carbonatado	300-700	15-17	<300	<1.000
06.45	Jarastepar	Carbonatado	--	13-16	--	<1.000
06.46	Junquera-Las Nieves	Carbonatado	--	14-16	--	<1.000
06.47	Guadiaro y Hozgarganta	Detrítico	2-50	18-23	30-50	1.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
06.48	Sotogrande	Detrítico	40-90	18-23	5-30	<750
06.49	Guadarranque-Palmones	Detrítico	5-100	18-23	10-30	<1.000
06.50	La Línea	Detrítico	<20	17-20	5-10	<1.000
07.07	Fuente Segura-Fuensanta	Carbonatado	<500	14-17	<30	<1.000
07.14	Segura-Madera-Tus	Carbonatado	<500	14-17	<30	<1.000
07.20	Alto Quipar	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000
07.26	Valdeinfierno	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000
07.27	Orce-María	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000
07.33	Águilas	Detrítico	5-20	16-18	<30	600-3.000
07.36	Calar del Mundo	Carbonatado	<500	14-17	<30	<1.000
07.39	Castril	Carbonatado	<500	14-17	<30	<1.000
07.43	Sierra de Almagro	Carbonatado	--	15-17	<50	--
07.44	Saltador	Detrítico	<500	17-18	--	<3.000
07.45	Saliente	Carbonatado	50-100	14-17	<50	<1.000
07.46	Chirivel-Vélez	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000
07.54	Sierra de la Zarza	Carbonatado	<150	14-17	<50	<1.000

Tabla 7.5. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Aragón para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
02.22	Queiles-Jalón	Detrítico	10-30	14-16	--	--
09.02.03	Sierra de Leyre	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.02.04	Peña Ezcaurri-Peña Telera	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.02.05	Tendeñera-Monte perdido	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
09.02.06	Sto. Domingo-Guara	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.02.21	Larra	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.03.01	Alto Esera-Valle de Arán	Detrítico	--	9-13	--	<1.000
09.03.02	Cotiella-Turbón	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.03.03	Tremp-Isona	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.03.04	Litera Alta	Carbonatado	--	9-13	--	<1.000
09.04.06	Aluvial del Ebro: Tudela-Gelsa	Detrítico	20-40	13-16	20	1.000-3.000
09.04.09	Arbas	Carbonatado	--	10-14	--	--
09.04.10	Aluvial del Gállego	Detrítico	20-40	13-15	30	<1.000
09.04.11	Hoyo de Huesca	Detrítico	<100	12-14	--	--
09.04.12	Aluvial del Cinca	Detrítico	10-50	12-15	--	--
09.04.13	Aluvial del Segre	Detrítico	20-40	12-15	--	--
09.06.02	Somontano del Moncayo	Detrítico y Carbonatado	50-100	13-15	--	--
09.06.03	Campo del Cariñena	Detrítico	20-50	13-16	--	--
09.06.04	Campo de Belchite	Detrítico	20-50	13-16	--	--
09.06.05	Depresión de Calatayud	Detrítico	20-50	13-16	--	--
09.07.02	Parámos del Alto Jalón	Carbonatado	--	13-16	--	--
09.08.01	Cubeta de Oliete	Carbonatado	50-100	14-16	10-20	<500
09.08.02	Aliaga-Calanda	Carbonatado				<500
09.08.04	Puertos de Beceite	Carbonatado	>150	13-15	--	--
09.08.22	Alto Maestrazgo	Carbonatado				<500

Tabla 7.6. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) del Principado de Asturias para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
115	Santillana-S. Vicente de la Barquera	Carbonatado	--	11-20	--	<500
116	Llanes-Ribadesella	Carbonatado	--	12-15	--	<500
117	Picos de Europa-Panes	Carbonatado	--	12-20	--	<500
118	Región del Ponga	Carbonatado	--	12-20	--	<300
119	Villaviciosa	Carbonatado	--	14-15	--	<500
120	Llantones	Detrítico y Carbonatado	--	7-15	--	<1.500
121	Pinzales-Noreña	Carbonatado	--	--	--	<500
122	Oviedo-Cangas Onís	Detrítico y Carbonatado	--	15-40	13-16	<700
123	Peña Ubiña-Peña Rueda	Carbonatado	--	12-15	--	<500
124	Somiedo-Trubia-Pravia	Carbonatado	--	12-13	--	<300

Tabla 7.7. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Illes Balears para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
18.02	Deiá	Carbonatado	0-100	14-17	--	--
18.04	Formentor	Carbonatado	0-50	14-17	--	--
18.05	Almadrava	Carbonatado	--	--	--	1.000-5.000
18.06	Fonts de Sóller	Carbonatado	0-50	14-17	--	--
18.07	Fonts	Carbonatado	0-100	14-17	--	<500
18.08	S´Estremera	Carbonatado	0-100	14-17	>50	<500
18.09	Alaró	Carbonatado	0-100	14-17	--	--

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
18.11	Inca-Sa Pobla	Detrítico	10-100	14-17	--	<1.000
18.12	Calviá	Carbonatado	0-100	14-17	--	--
18.13	Na Burguesa	Carbonatado	0-50	14-16	20-30	<1.000
18.14	Pla de Palma	Detrítico	0-50	14-18	10-50	1.000-10.000
18.15	Serres Centrals	Carbonatado	15-500	14-17	<10	<500
18.16	La Marineta	Carbonatado	10-50	14-17	>140	<500
18.17	Artá	Carbonatado	--	14-17	--	--
18.21	Llucmajor-Campos	Detrítico	10-100	14-17	--	1.000-5.000
19.03	Fornells	Carbonatado	10-25	14-17	--	500-1.000
20.01	Sant Miquel	Carbonatado	--	15-18	--	--
20.02	Sant Antoni	Carbonatado	--	--	10-30	500-2.000
20.03	Santa Eularia	Carbonatado	--	15-18	--	1.000-3.000
20.04	Sant Carles	Carbonatado	--	15-18	--	--
20.05	Sant Josep	Carbonatado	--	15-18	--	--
20.06	Eivissa	Detrítico y Carbonatado	--	15-18	25-30	--

Tabla 7.8. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Cantabria para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
109	Castro Urdiales-Ajo	Carbonatado	--	11-20	--	<500
110	Alisa-Ramales	Carbonatado	--	11-16	<50	<500
111	Santander-Camargo	Carbonatado	--	11-20	--	<500
112	Puerto del Escudo	Carbonatado	--	15-24	--	<500

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
113	Cabuérniga	Carbonatado	--	12-24	--	<500
114	Pte. Viesgo-Besaya	Carbonatado	--	12-16	--	--
115	Santillana-S. Vicente de la Barquera	Carbonatado	--	11-20	--	<500
116	Llanes-Ribadesella	Carbonatado	--	12-15	--	<500
117	Picos de Europa-Panes	Carbonatado	--	12-20	--	<500

Tabla 7.9. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Castilla y León para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
112	Puerto del Escudo	Carbonatado	--	12-24	--	<500
117	Picos de Europa-Panes	Carbonatado	--	15-20	--	<500
118	Región del Ponga	Carbonatado	--	12-20	--	<500
123	Peña Ubiña-Peña Rueda	Carbonatado	--	12-15	--	<500
124	Somiedo-Trubia-Pravia	Carbonatado	--	--	12-13	--
02.01	La Robla-Guardo	Carbonatado	--	10-12	--	<200
02.02	Quintanilla-P. Horadada-Atapuerca	Carbonatado	--	10-14	--	<200
02.03	Rañas Órbigo-Esla	Detrítico	10-50	12-15	39113	200-1.000
02.04	Rañas del Esla-Cea	Detrítico	10-50	12-15	--	--
02.05	Rañas Cea-Carrión	Detrítico	--	12-15	39113	200-1.000
02.06	Río Esla-Valderaduey	Detrítico	10-50	12-15	1-20	200-1.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
02.07	Páramo de Torozos	Carbonatado	5-20	13-16		<1.000
02.08	Central del Duero	Detrítico	10-50	12-16	--	200-1.000
02.09	Burgos-Arlanza	Detrítico	10-50	12-15	1-20	200-1.000
02.12	Aluviales del Duero	Detrítico	5-20	14-17	--	<1.000
02.13	Páramo de Cuéllar	Carbonatado	5-50	13-16	10-30	<1.000
02.14	Páramo del Duratón	Carbonatado	5-50	13-16		<1.000
02.15	Cubeta de Almazán	Detrítico	5-60	13-16	1-15	<1.000
02.17	Región de los Arenales	Detrítico	10-50	13-16	10-20	<1.000
02.18	Segovia	Detrítico y Carbonatado	--	13-15	--	<300
02.19	C. Rodrigo-Salamanca	Detrítico	--	13-16	--	--
9.0102	Páramos de Sedano y La Lora	Carbonatado	--	10-14	--	<500
9.0103	Sinclinal de Villarcayo	Carbonatado	--	10-14	--	<500
9.0104	Montes Obarenes	Carbonatado	--	10-12	--	<500
9.0105	Sinclinal de Treviño	Detrítico	--	8-10	--	<500
9.0106	Calizas de Subijana	Carbonatado		10-14	--	200-500
09.04.01	Aluvial del Oca	Detrítico	5-10	12-15	--	<1.000

Tabla 7.10. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Castilla-La Mancha para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
03.02	Tajuña-Montes Universales	Carbonatado	50-100	10-12	--	<500
03.03	Torrelaguna-Jadraque	Carbonatado	--	10-14	--	<500
03.04	Guadalajara	Detrítico	20-100	12-15	--	<1.000
03.05	Madrid-Talavera	Detrítico	20-100	14-17	--	<1.000
03.06	La Alcarria	Carbonatado	20-50	14-16	--	--
03.08	Ocaña	Detrítico y Carbonatado	20-50	14-16	--	<1.000
03.09	Tiéter	Detrítico	20-100	14-17	--	<1.000
04.01	Sierra de Altomira	Carbonatado	--	12-14	--	<200
04.02	Lillo-Quintanar	Detrítico y Carbonatado	20-50	14-16	--	<1.000
04.03	Consuegra-Villacañas	Detrítico y Carbonatado	20-50	14-16	--	<1.000
04.04	Mancha Occidental	Detrítico y Carbonatado	20-100	14-16	--	500-5.000
04.05	Ciudad Real	Detrítico y Carbonatado	20-100	14-16	--	500-5.000
04.06	Campo de Montiel	Carbonatado	20-40	13-16	--	<1.000
04.07	Bullaque	Detrítico	20-100	14-16	--	<1.000
05.65	Campo de Montiel	Carbonatado	20-40	13-16	--	<1.000
08.17	Serranías de Cuenca	Carbonatado	--	10-14	--	<1.500
08.24	Utiel-Requena	Carbonatado	--	12-15	--	--
08.29	Mancha Oriental	Carbonatado	50-200	12-15	50-150	<1.000
08.30	Jardín-Lezuza	Carbonatado	20-100	12-15	30-100	<1.000

Tabla 7.11. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Cataluña para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
09.03.01	Alto Esera-Valle de Arán	Detrítico y metamórfico	10-50	8-10	--	<200
09.03.03	Tremp-Isona	Carbonatado	50-300	10-13	--	--
09.03.05	Sierras Marginales Catalanas	Carbonatado	50-300	10-13	--	<1.000
09.03.06	Cerdaña	Detrítico y carbonatado	10-50	8-10	--	<200
09.03.21	Cadí-Port del Compte	Carbonatado	50-300	10-14	--	--
09.04.13	Aluvial del Segre	Detrítico	20-40	12-15	--	--
09.04.14	Aluvial de Urgell	Detrítico	5-15	14-17	--	<1.000
09.04.15	Calizas de Tárrega	Carbonatado	50-200	13-17	--	<1.000
09.08.04	Puertos de Beceite	Carbonatado	50-200	12-20	--	<1.000
09.08.05	Fosa de Mora	Carbonatado	50-200	13-18	--	<1.000
09.08.06	Priorato	Carbonatado	50-200	13-16	--	<1.000
09.08.07	Montsant	Carbonatado	50-100	14-17	--	<1.000
09.08.21	Bajo Ebro-Montsiá	Detrítico	5-15	14-17	--	500-5.000
10.01	Baix Muga y Fluviá	Detrítico	10-30	14-17	--	<1.000
10.02	Baix ter	Detrítico	10-30	14-17	--	<1.000
10.03	Empordá	Detrítico	50-100	16-20	--	<1.000
10.04	Figueres	Detrítico y carbonatado	10-50	10-12	--	<500
10.05	Banyoles	Carbonatado	10-50	12-14	--	<1.000
10.06	Olot	Carbonatado	10-50	12-14	--	<1.000
10.07	Ter Mig	Detrítico	5-20	13-16	--	<1.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
10.08	Pals-La Bisbal	Detrítico	50-100	14-16	--	<1.000
10.09	La Selva	Detrítico	50-100	13-16	--	<1.000
10.10	Aubi	Detrítico	5-20	14-16	--	<1.000
10.11	Ridaura	Detrítico	5-20	14-16	--	<1.000
10.12	Tordera Baix	Detrítico	5-15	14-17	--	500-5.000
10.13	Terdera Mig y Alt	Detrítico	20-20	13-17	--	500-2.000
10.14	Alt Maresme	Detrítico	5-10	15-18	--	500-5.000
10.15	Baix Maresme	Detrítico	5-10	15-18	--	500-5.000
10.16	Delta del Besós	Detrítico	5-10	15-18	--	500-5.000
10.17	Cubetas del Besós	Detrítico	10-20	14-17	--	<2.000
10.18	Vallés	Detrítico	50-500	13-16	--	<2.000
10.19	Baix Llobregat	Detrítico	5-10	15-18	--	500-5.000
10.20	Garraf	Carbonatado	50-100	12-16	--	500-5.000
10.21	Penedés	Detrítico	20-100	13-16	--	<1.000
10.22	Cordillera Prelitoral	Carbonatado	50-200	13-16	--	<1.000
10.23	Bloque de Gaiá	Carbonatado	50-200	15-18	--	500-2.000
10.24	Alt Camp	Detrítico	20-100	14-17	--	<2.000
10.25	Camp de Tarragona	Detrítico	20-100	15-18	--	500-5.000
10.26	La Musara	Carbonatado	50-100	14-17	--	<1.000
10.27	Vandellós-Llaberia	Carbonatado	20-200	13-16	--	<1.000
10.28	Cardó-Perelló	Carbonatado	50-200	13-16	--	<1.000
10.30	Cadi-Taga-Ripoll	Detrítico y metamórfico	50-250	10-13	--	<1.000

Tabla 7.12. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de la Comunitat Valenciana para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
07.05	Jumilla-Villena	Carbonatado	150-250	15-18	10-50	500-2.000
07.09	Ascoy-Sopalmo	Carbonatado	100-300	16-18	10-100	500-2.000
07.24	Vega Media y Baja del Segura	Detrítico	20-100	18-22	--	500-5.000
07.48	Terciario de Torrevieja	Detrítico	20-50	18-22	--	500-5.000
08.06	Mosqueruela	Carbonatado	20-200	16-18	--	<1.000
08.07	Maestrazgo	Carbonatado	50-400	18-20	10-90	500-3.000
08.09	Plana de Cenia	Detrítico	10-50	16-18	--	500-2.000
08.10	Plana de Vinaroz-Peñíscola	Detrítico	10-20	18-20	--	500-5.000
08.11	Plana Oropesa-Torreblanca	Detrítico	10-20	18-20	--	500-5.000
08.12	Plana de Castellón	Detrítico	10-150	18-20	10-50	500-5.000
08.13	Onda	Carbonatado	--	16-18	--	<1.000
08.14	Alto Palancia	Carbonatado	--	16-18	--	<500
08.15	Alpuente	Carbonatado	--	18-20	--	200-1.000
08.18	Las Serranías	Carbonatado	100-200	16-18	--	<1.000
08.19	Alcublas	Carbonatado	--	18-20	--	<1.000
08.20	Medio Palancia	Carbonatado	50-200	18-20	10-30	500-5.000
08.21	Plana de Sagunto	Detrítico	10-50	18-22	--	500-5.000
08.23	Buñol-Cheste	Detrítico y carbonatado	20-300	18-20	20-50	200-2.000
08.24	Utiel-Requena	Detrítico	20-200	18-20	10-50	<1.000
08.25	Plana Valencia Norte	Detrítico	15-100	18-22	--	500-3.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
08.26	Plana Valencia Sur	Detrítico	15-100	18-22	--	500-3.000
08.27	Caroch Norte	Carbonatado	50-200	16-18	--	200-2.000
08.28	Caroch Sur	Carbonatado	50-200	16-18	--	<1.000
08.31	Sierra de las Agujas	Carbonatado	50-100	18-20	--	<1.000
08.32	Sierra Grossa	Carbonatado	100-300	18-22	--	200-1.500
08.36	Villena-Benejama	Carbonatado	50-200	16-18	--	200-2.000
08.37	Almirante-Mustalla	Carbonatado	100-200	16-20	--	<1.000
08.38	Plana Gandía-Denia	Detrítico	10-150	18-22	--	500-5.000
08.39	Almudaina-Alfaro-Mediodia-Segaria	Carbonatado	50-150	18-20	--	500-3.000
08.40	Sierra Mariola	Carbonatado	50-200	16-20	--	500-2.000
08.41	Peñarrubia	Carbonatado	50-250	18-20	--	300-2.000
08.42	Serral-Salinas	Carbonatado	150-200	15-18	--	500-2.000
08.43	Argüeña-Maigmo	Carbonatado	--	18-20	--	<1.000
08.44	Barrancones-Carrasqueta	Carbonatado	--	18-20	--	<1.000
08.46	Serrella-Aixorta-Algar	Carbonatado	50-200	16-20	--	<1.000
08.47	Peñón-Montgó-Bernia-Benisa	Carbonatado	50-200	18-22	--	500-2.000
08.48	Orcheta	Carbonatado	20-200	18-22	--	300-3.000
08.49	Agost-Monnegre	Carbonatado	50-200	18-20	20-100	<1.500
08.50	Sierra del Cid	Carbonatado	50-300	16-19	--	500-2.000
08.51	Quibas	Carbonatado	--	16-18	5-25	500-2.000
08.52	Sierra de Crevillente	Carbonatado	50-200	18-20	--	500-5.000

Tabla 7.13. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Extremadura para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
03.09	Tiétar	Detrítico y Metamórfico	5-20	14-16	--	<500
03.10	Talaván	Detrítico	5-20	14-16	--	<500
03.11	Zarza de Granadilla	Detrítico	5-10	14-16	--	<1.000
03.12	Galisteo	Detrítico y Metamórfico	5-20	14-16	--	<500
03.13	Moraleja	Detrítico y Metamórfico	10-20	14-16	--	<500
04.08	Vegas Altas	Detrítico	3-15	15-18	--	<500
04.09	Vegas Bajas	Detrítico	3-15	15-18	>50	<1.000
04.10	Tierra de Barros	Detrítico	10-50	15-18	--	500-2.000
04.11	Zafra-Olivenza	Carbonatado	50-300	14-17	--	<500
05.45	Sierra Morena	Carbonatado	<100	14-18	<30	<1.000

Tabla 7.14. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de Galicia para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
126	Bajo Miño	Detrítico	5-15	15-18	--	<1.000
127	Xinzo de Limia	Detrítico	5-15	14-17	--	<500

Tabla 7.15. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de la Comunidad de Madrid para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
03.03	Torrelaguna-Jadraque	Carbonatado	--	10-14	--	<500
03.04	Guadalajara	Detrítico	50-200	12-15	--	<1.000
03.05	Madrid-Talavera	Detrítico	50-200	14-17	--	<1.000
03.06	La Alcarria	Carbonatado	20-50	14-16	--	--
03.08	Ocaña	Detrítico y carbonatado	50-100	14-16	--	<1.000

Tabla 7.16. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de la Región de Murcia para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
07.05	Jumilla-Villena	Carbonatado	150-250	15-18	10-50	500-2.000
07.06	El Molar	Carbonatado	100-200	15-18	40-100	<1.000
07.08	Sinclinal de Calasparra	Carbonatado	--	15-17	30-80	<1.000
07.09	Ascoy-Sopalmo	Carbonatado	100-300	16-18	10-100	500-2.000
07.10	Serral-Salinas	Carbonatado	150-200	15-18	--	500-2.000
07.11	Quibas	Carbonatado	--	16-18	5-25	500-2.000
07.13	Oro-Ricote	Carbonatado	--	15-18	--	500-1.500
07.17	Caravaca	Carbonatado	--	15-18	40-100	500-2.000
07.20	Alto Quipar	Carbonatado	--	16-18	--	<1.000
07.21	Bullas	Carbonatado	50-200	15-17	60-100	<1.000
07.22	Sierra Espuña	Carbonatado	50-200	16-18	--	<1.000
07.23	Vega Alta del Seguro	Detrítico	5-30	15-18	10-50	500-3.000
07.24	Vega media y baja del Segura	Detrítico	10-50	16-18	20-40	1.000-5.000

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
07.28	Alto Guadalentín	Detrítico	20-50	16-18	10-30	1.000-3.000
07.29	Trásico del Carrascoy	Carbonatado	80-300	18-30	5-50	500-5.000
07.30	Bajo Guadalentín	Detrítico	20-120	16-18	20-30	1.000-5.000
07.31	Campo de Cartagena	Detrítico y carbonatado	30-200	18-25	10-50	1.000-5.000
07.32	Mazarrón	Detrítico y carbonatado	50-300	18-25	--	500-5.000
07.33	Aguilas	Detrítico y carbonatado	20-200	16-20	--	200-3.000
07.37	Anticlinal de Socovos	Carbonatado	50-200	15-18	--	<1.000
07.41	Baños de Fortuna	Carbonatado	--	16-30	--	500-3.000
07.46	Chirivel-Vélez	Carbonatado	--	14-17	--	500-3.000
07.51	Sierra de Carta-gena	Carbonatado y metamórfico	50-200	16-20	--	500-3.000
07.52	Cuaternario de Fortuna	Detrítico	10-40	15-17	--	500-2.000

Tabla 7.17. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de la Comunidad Foral de Navarra para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
107	Aralar-Ulzama	Carbonatado		10-12		<500
9.0109	Sierra de Lóquiz	Detrítico y carbonatado	20-50	10-12		<500
9.0110	Sierra de Urbasa	Carbonatado	20-50	10-12		<500
9.0111	Basaburua-Ulzama	Carbonatado		9-13		<200
9.0122	Aizkorri	Carbonatado		10-12		<500
9.0123	Sierra de Aralar	Carbonatado		10-12		<500
09.02.01	Alto Irati	Detrítico y carbonatado		10-13		<200

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
09.02.02	Sierra de Alaiz	Detrítico y carbonatado		10-12		<200
09.02.03	Sierra de Leyre	Carbonatado		9-13		<1.000
09.02.04	Peña Ezcaurri-Peña Telera	Carbonatado		9-13		<1.000
09.04.04	Aluvial del Ebro: Cenicero-Lodosa	Detrítico	5-10	13-16		200-1.000
09.04.05	Aluvial del Ebro: Lodosa-Tudela	Detrítico	3-10	13-16		200-1.000
09.04.06	Aluvial del Ebro: Tudela-Gelsa	Detrítico	20-40	13-16	20	1.000-3.000
09.04.07	Arga Medio	Detrítico	5-15	12-15		<500
09.04.08	Aluvial del Cidacos	Detrítico	5-15	13-15		<1.000
09.05.02	Fitero-Arnedillo	Detrítico	5-20	13-16		200-1.000

Tabla 7.18. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) del País Vasco para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
101	San Sebastián	Detrítico	10-20	11-13	--	<1.000
102	Tolosa	Carbonatado	--	12-14	--	<500
103	Itzarraitz	Carbonatado	--	10-13	--	<500
104	Navarniz	Carbonatado	--	11-13	--	<500
105	Oiz	Detrítico y carbonatado	20-50	10-13	--	<500
106	Munguía-Malzaga	Volcánico	--	11-13	--	<1.000
107	Aralar-Ulzama	Carbonatado	--	10-12	--	<500
108	Aitzgorri-Amboto-Ortuella	Carbonatado	--	10-13	--	<500
9.0105	Sinclinal de Treviño	Carbonatado	--	8-10	--	<500

(Continuación)

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
9.0106	Calizas de Subijana	Carbonatado	20-100	12-15	--	<1.000
9.0107	Aluvial de Vitoria	Carbonatado	10-30	11-14	--	<1.000
9.0109	Sierra de Lóquiz	Detrítico y carbonatado	20-50	10-12	--	<500
9.0110	Sierra de Urbasa	Carbonatado	20-50	10-12	--	<500
9.0121	Gorbea	Carbonatado	--	10-12	--	<1.000
9.0122	Aizkorri	Carbonatado	--	10-12	--	<500
09.04.04	Aluvial del Ebro: Cenicero-Lodosa	Detrítico	5-15	13-15	--	200-1.500

Tabla 7.19. Características de las aguas subterráneas (Unidades Hidrogeológicas) de la Rioja para su aprovechamiento térmico

UH	Nombre	Naturaleza	Profundidad (m)	Temperatura (ºC)	Caudal (l/s)	Conductividad (µs/cm)
9.0104	Montes Obarenes	Carbonatado	--	10-12	--	<500
09.04.03	Aluvial del Oja	Detrítico	3-10	13-16	--	200-1.000
09.04.05	Aluvial del Ebro: Lodosa-Tudela	Detrítico	3-10	13-16	--	200-1.000
09.04.04	Aluvial del Ebro: Cenicero-Lodosa	Detrítico	5-10	13-16	--	200-1.000
09.04.02	Aluvial del Tirón	Detrítico	5-10	13-16	--	200-1.000
09.05.01	Pradoluengo-Anguiano	Detrítico	5-20	13-16	--	200-1.000
09.05.02	Fitero-Arnedillo	Detrítico	5-20	13-16	--	200-1.000
09.05.03	Mansilla-Neila	Detrítico	5-20	13-16	--	200-1.000

Figura 7.18. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Andalucía

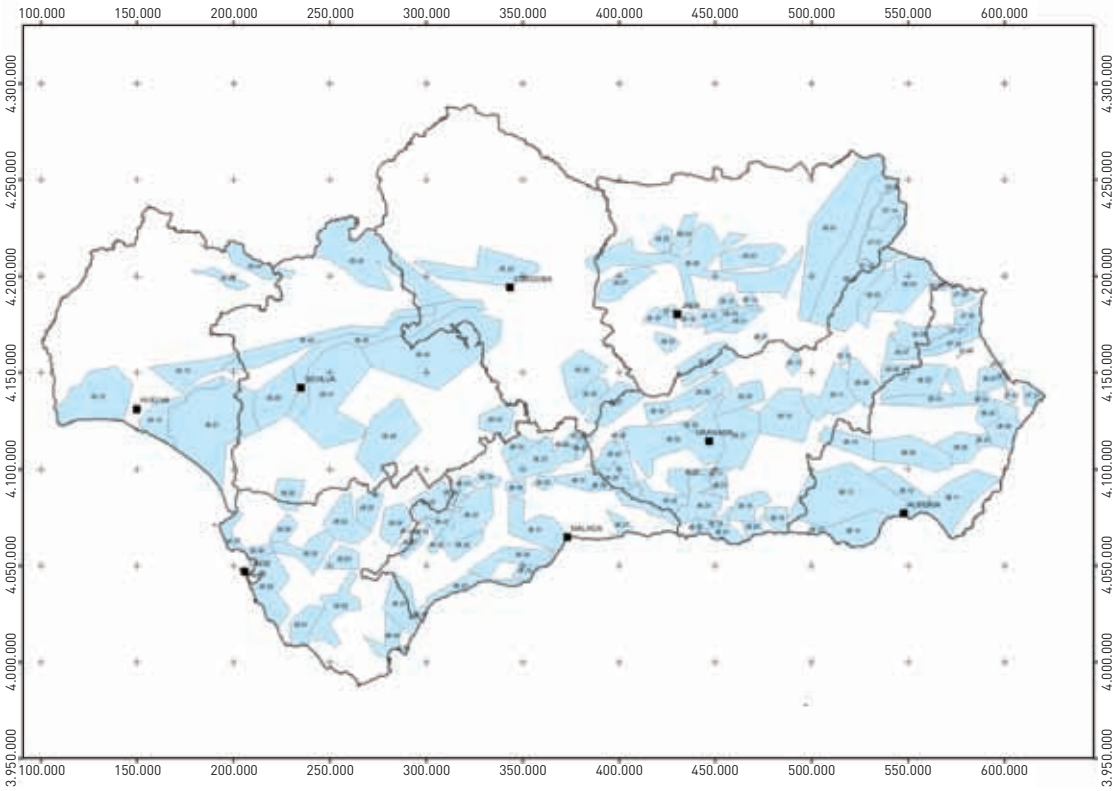


Figura 7.19. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Aragón

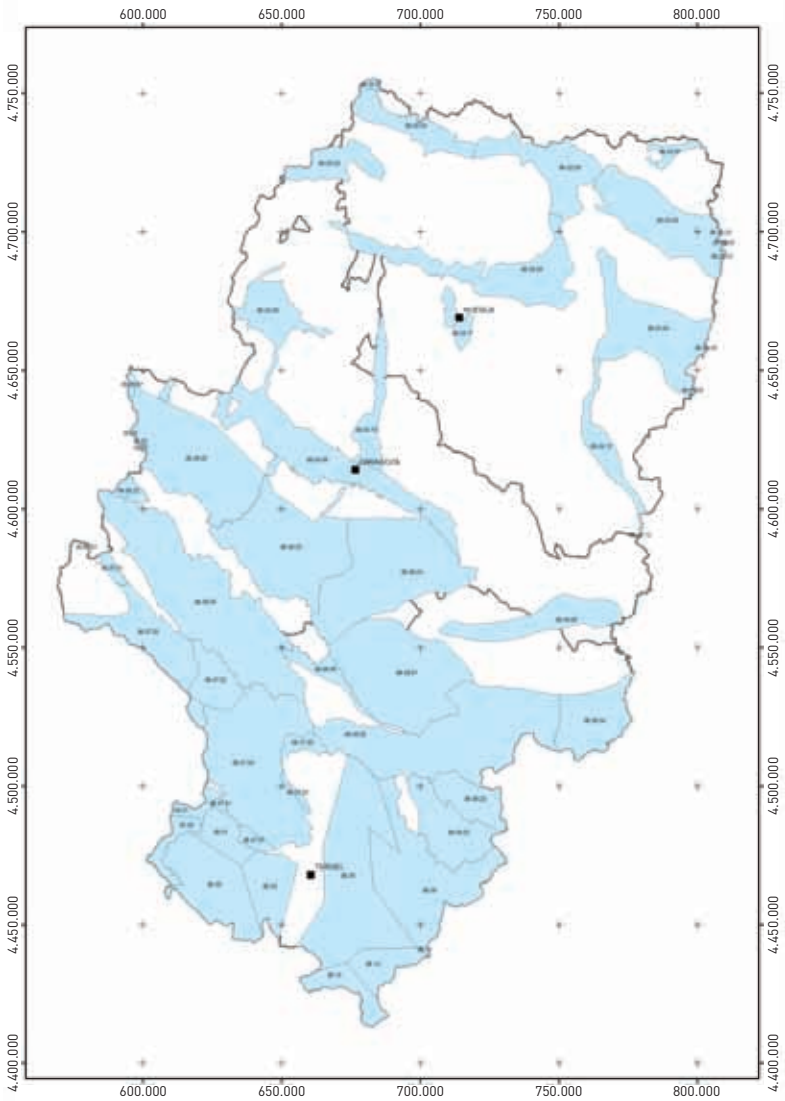


Figura 7.20. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en el Principado de Asturias

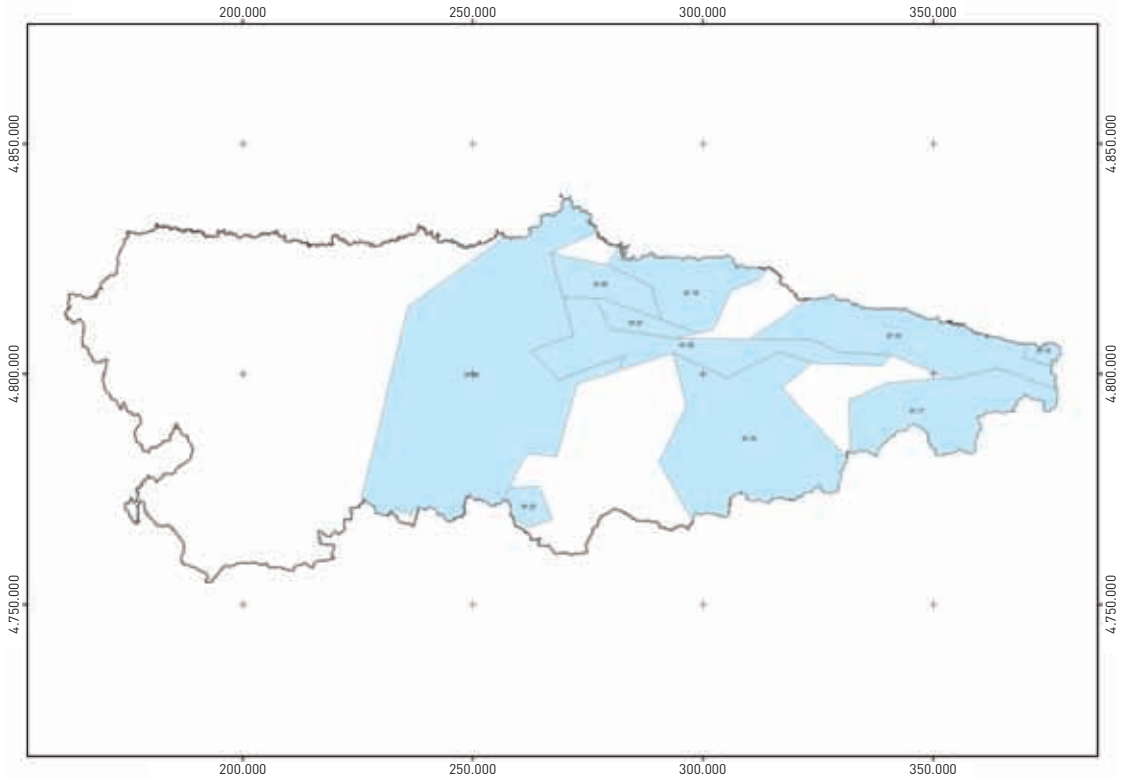


Figura 7.21. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Illes Balears

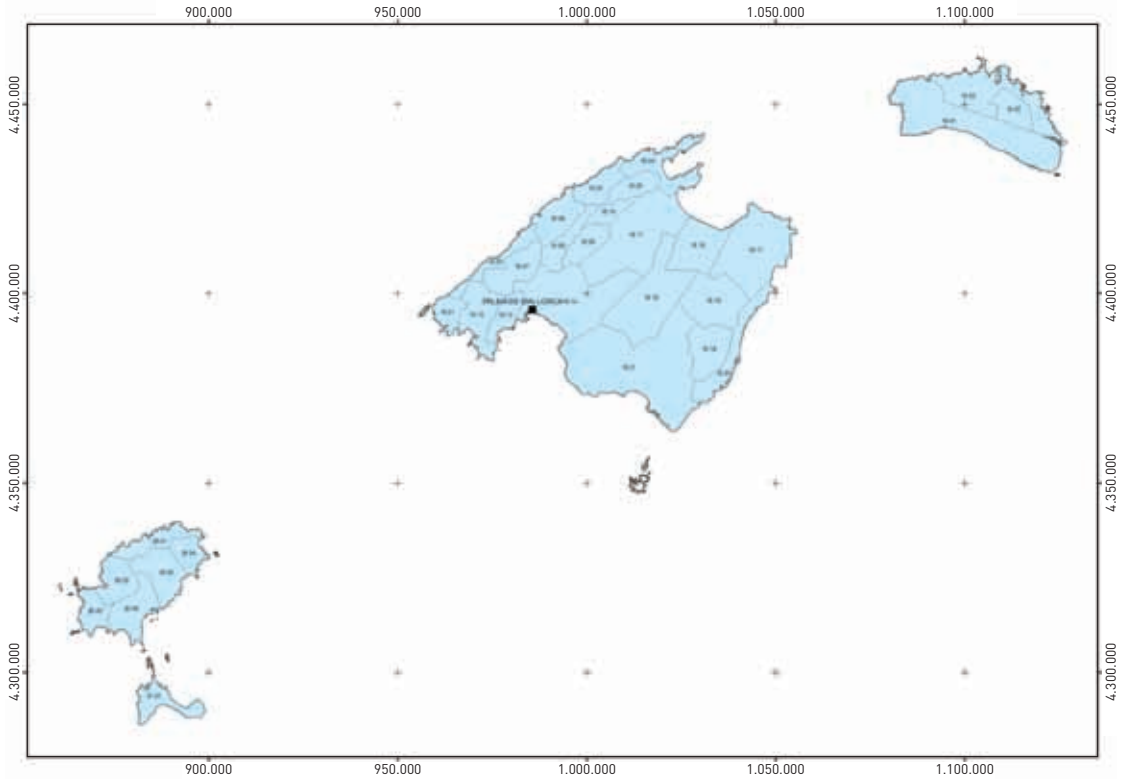


Figura 7.22. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Cantabria

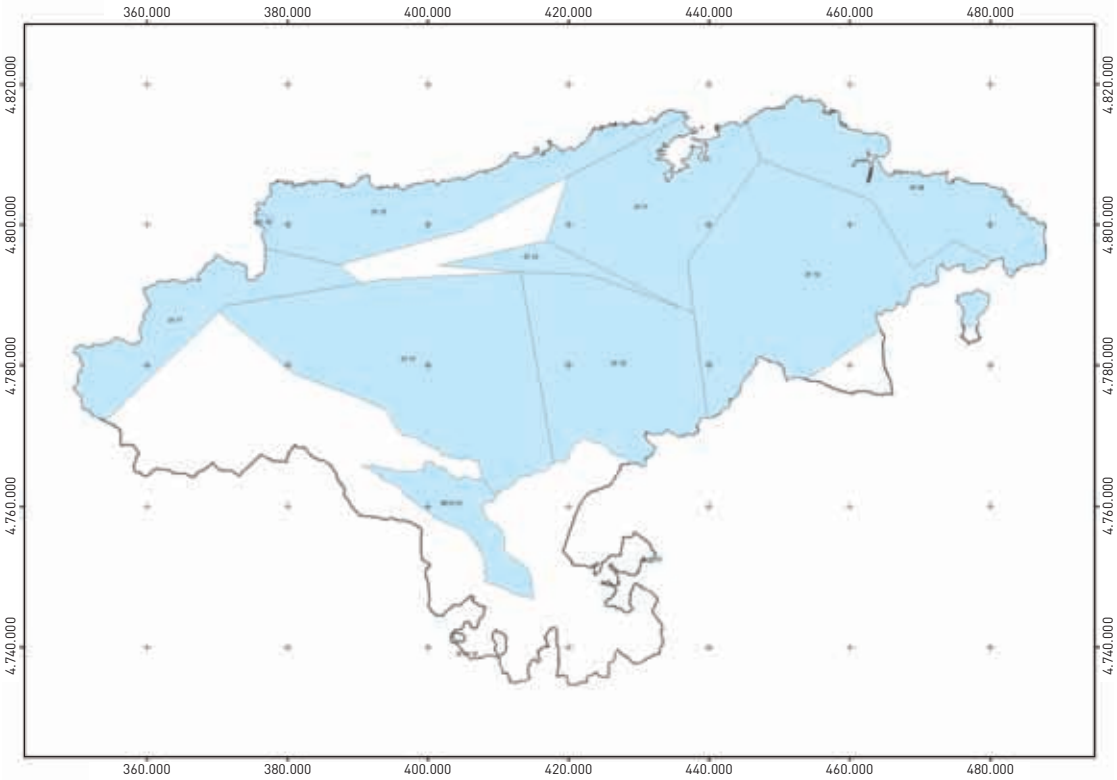


Figura 7.23. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Castilla y León

Figura 7.24. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Castilla–La Mancha

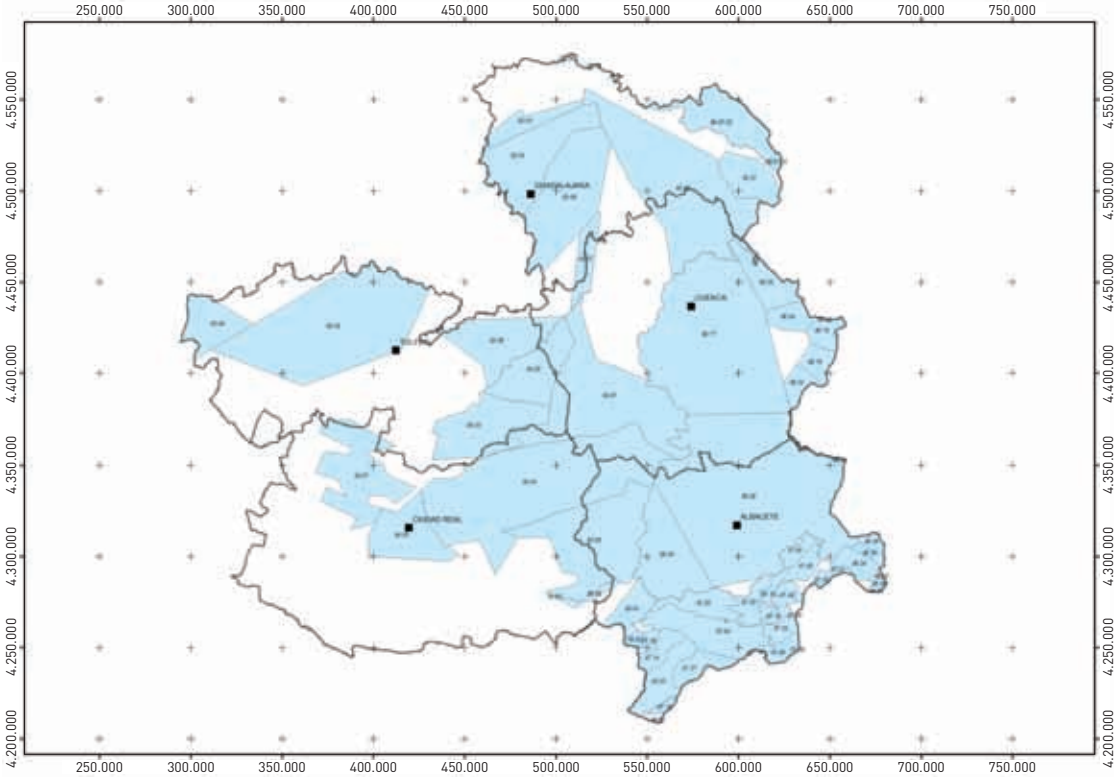


Figura 7.25. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Cataluña

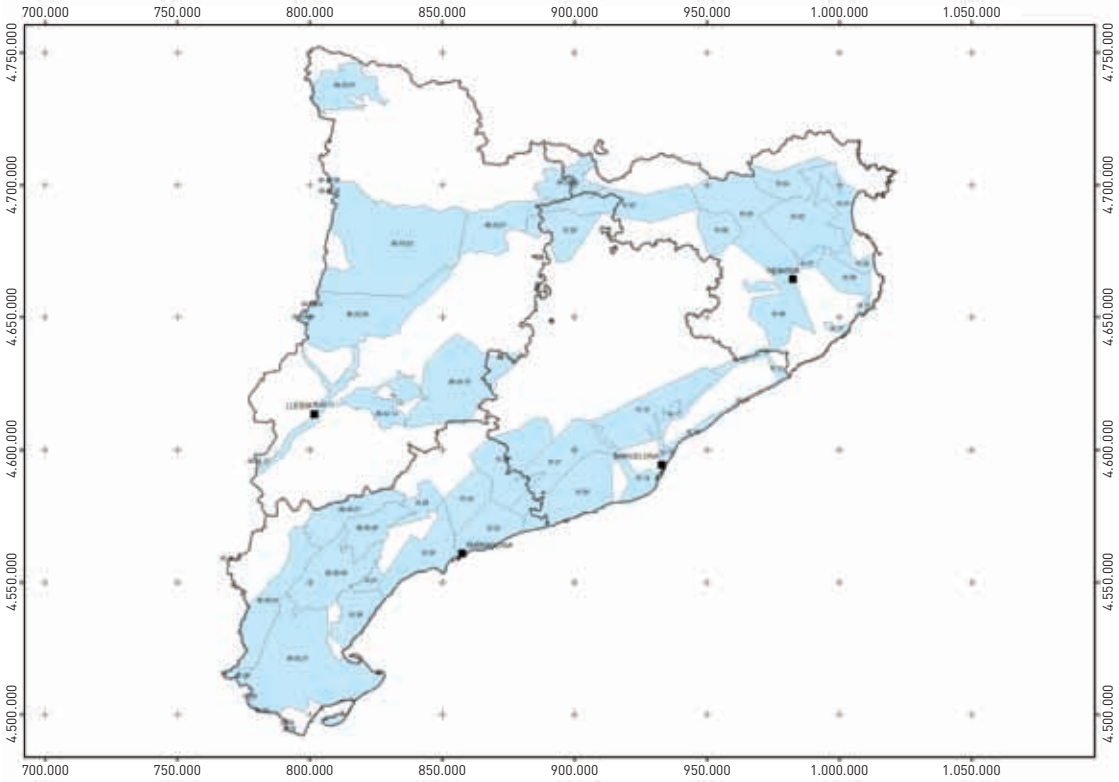


Figura 7.26. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Comunitat Valenciana

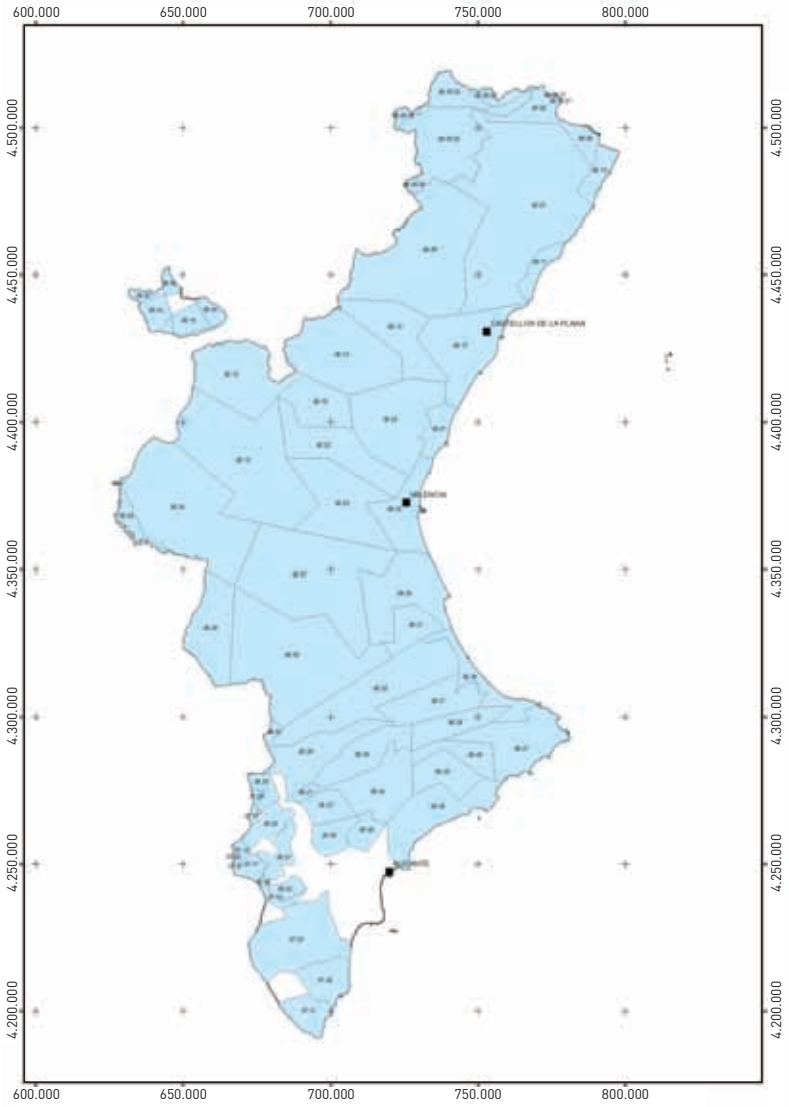


Figura 7.27. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Extremadura

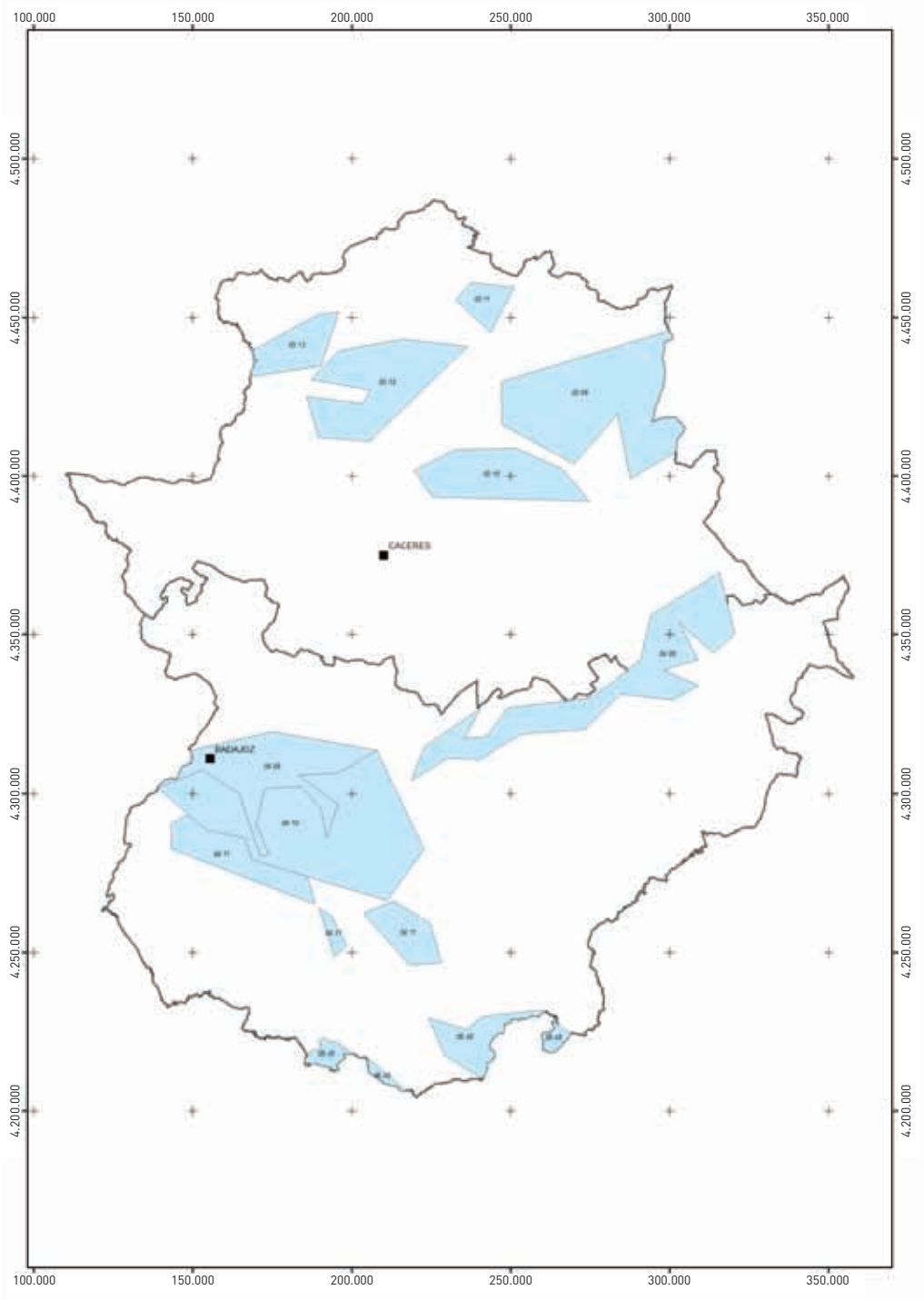


Figura 7.28. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en Galicia

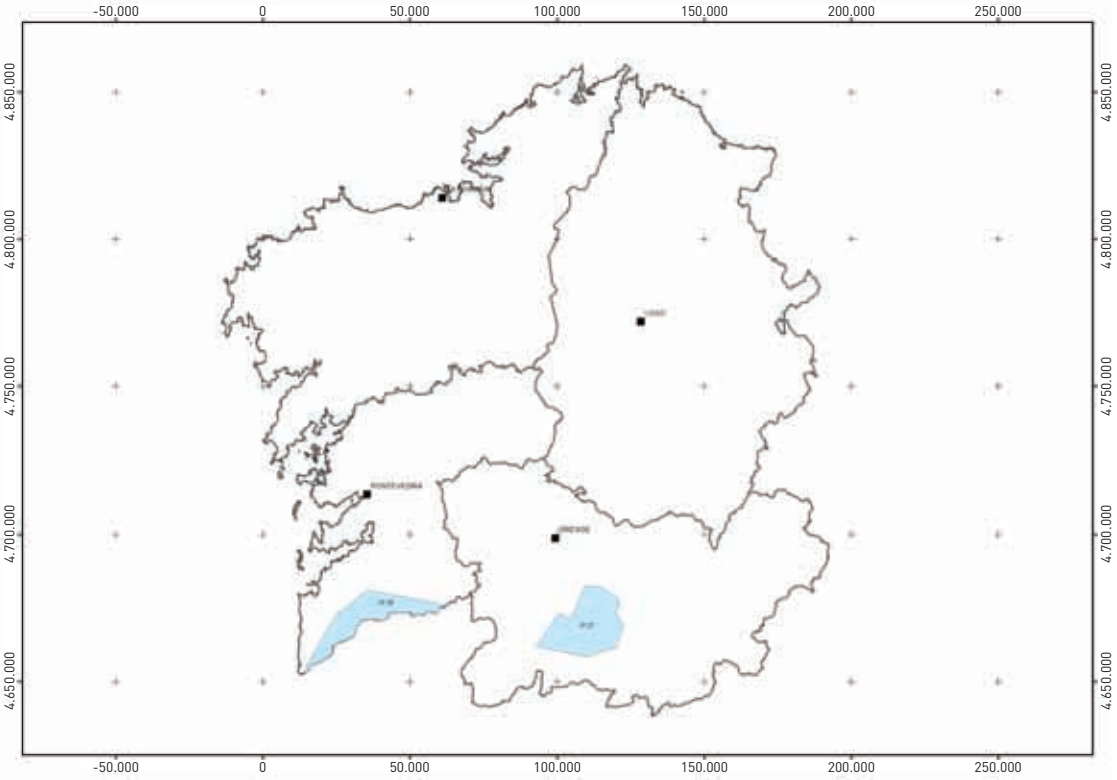


Figura 7.29. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en la Comunidad de Madrid

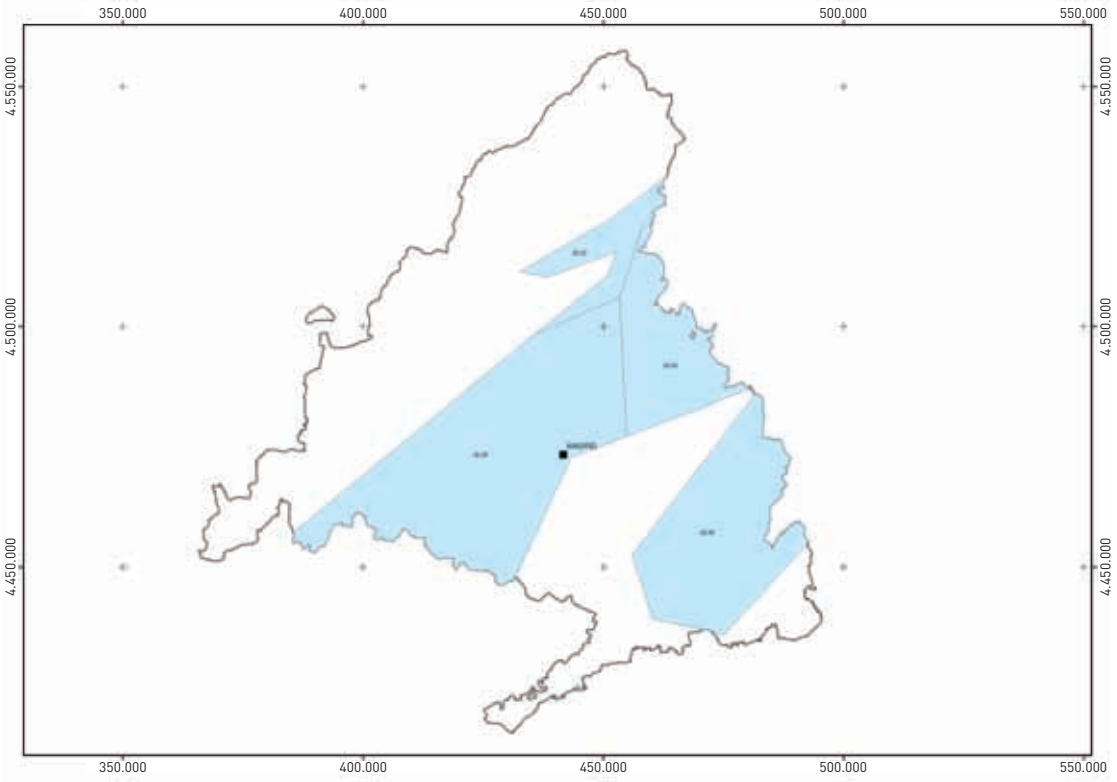


Figura 7.30. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en la Región de Murcia

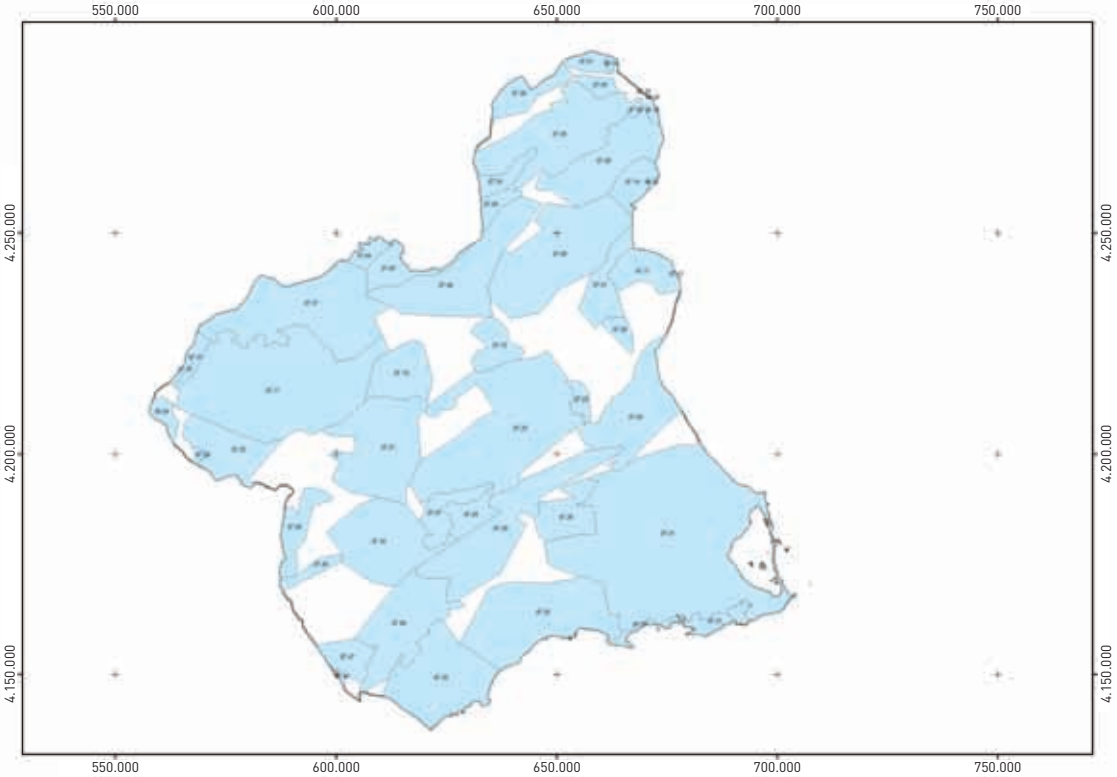


Figura 7.31. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en la Comunidad Foral de Navarra

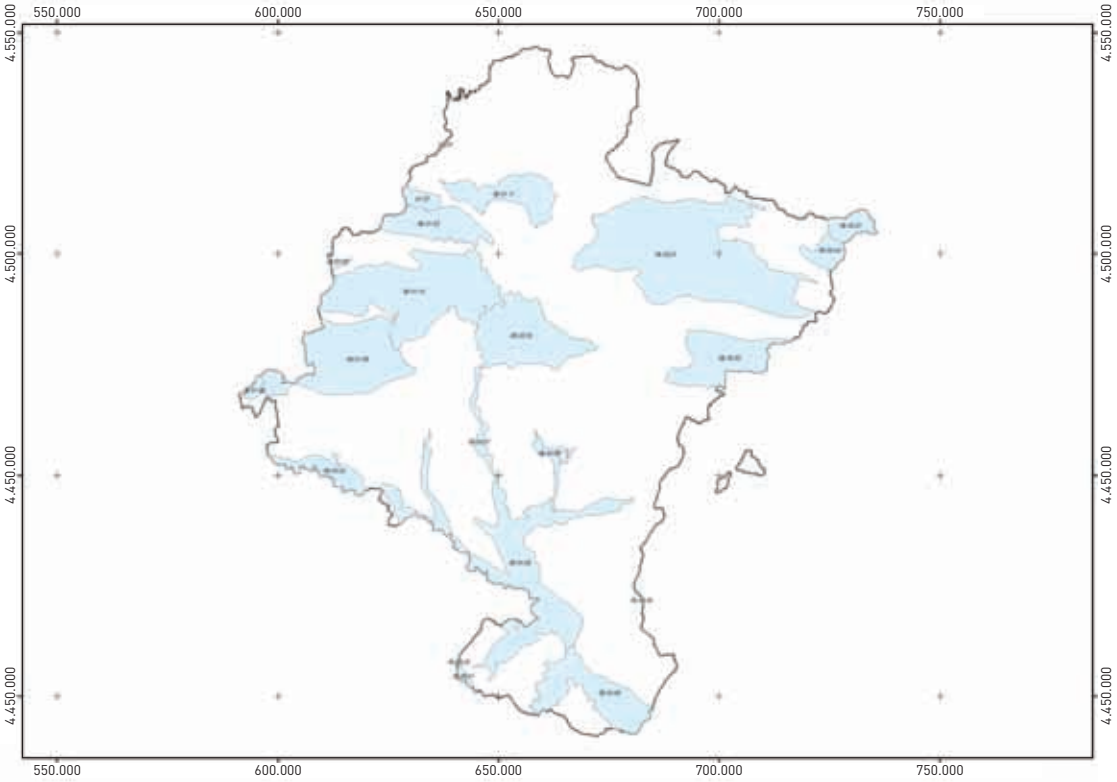


Figura 7.32. Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en el País Vasco

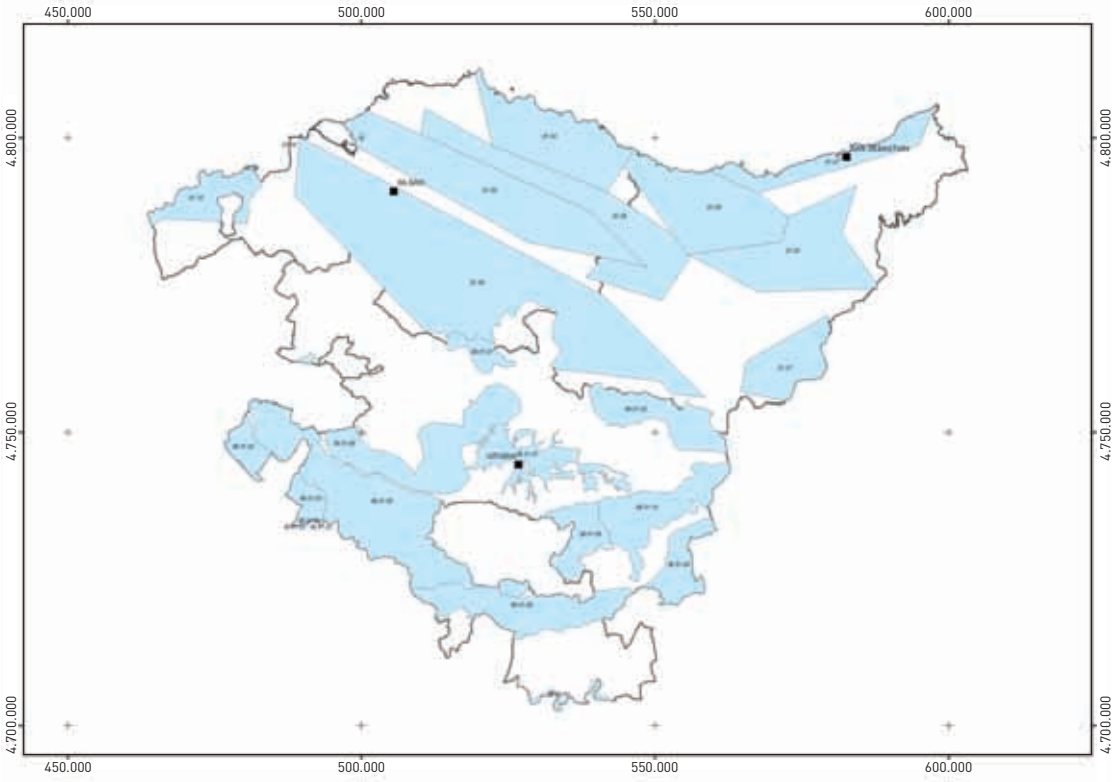
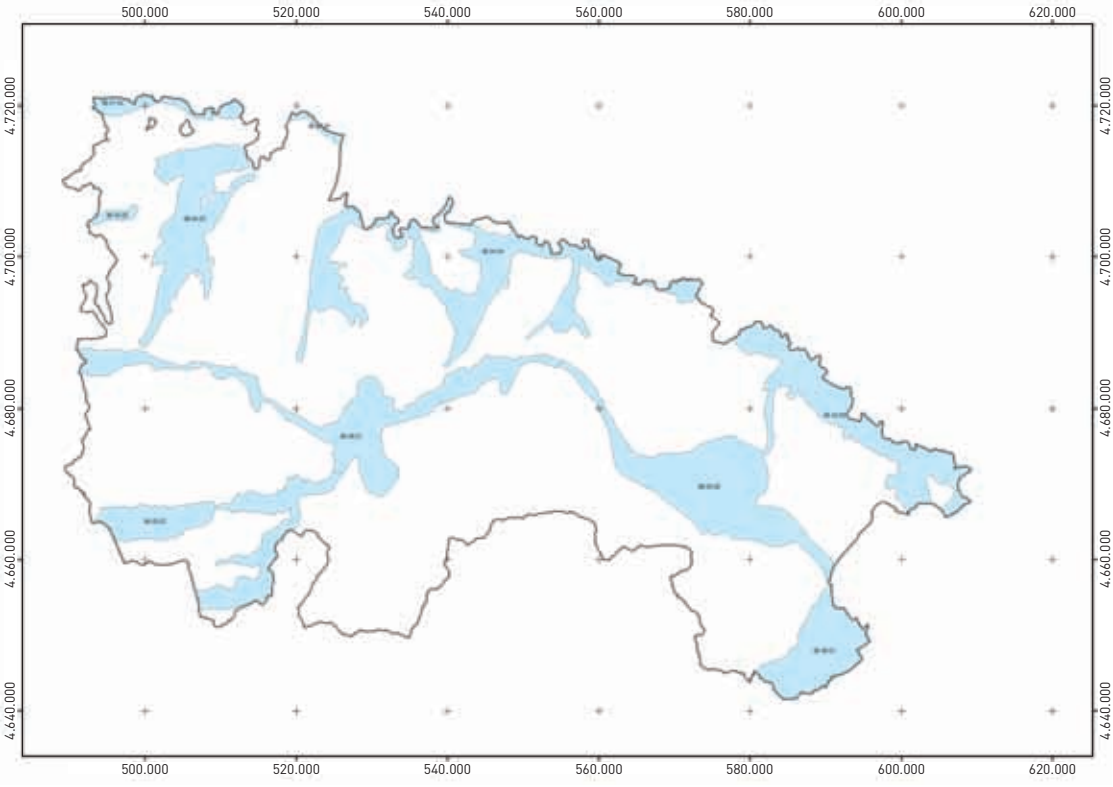


Figura 7.33 Mapa de situación de acuíferos para su uso térmico con bomba de calor en la Rioja



Para la elaboración de esta descripción sintetizada de los recursos geotérmicos de baja temperatura se han analizado todos los informes y documentos realizados por el Instituto Geológico y Minero de España y que se relacionan detalladamente en el Anexo 4.

En la Figura 7.34 se presenta un mapa de síntesis de las áreas con potencial recurso geotérmico de baja temperatura, con los datos básicos las mismas. También se han marcado con color más intenso las zonas en que por la existencia de demanda energética –existencia de consumidores potenciales detectados en estudios de previabilidad llevados a cabo en las décadas de los ochenta y noventa–, es posible que se desarrollen aprovechamientos geotérmicos bajo condiciones económicas favorables.

7.3.2 Recursos geotérmicos de baja temperatura en grandes cuencas sedimentarias

Existen desde el punto de vista geológico-geotérmico cinco grandes cuencas sedimentarias mesozoico-terciarias en España: Norte-Cantábrica, Ebro, Duero, Tajo-Mancha-Júcar y Guadalquivir.

En todas ellas existen materiales sedimentarios, de diferentes estratigrafías desde el Triásico hasta el Neógeno, que pueden contener y constituir formaciones permeables con recursos geotérmicos.

Cuenca del Duero

Constituye una gran cuenca de deposición mesozoico-terciaria, cuyo espesor de materiales supera en su zona más oriental los 3.000 metros. El área más occidental está dominada por los materiales paleozoicos del Macizo Hercínico que constituyen el zócalo o basamento de la cuenca, y por lo tanto no contienen sedimentos mesozoicos o terciarios que constituyan formaciones permeables o almacenes geotérmicos. El resto de la cuenca –zonal central y oriental- contiene un gran desarrollo de materiales mesozoico-terciarios, tanto más potente cuanto más se desplace hacia el límite oriental de la misma: Cordillera Ibérica. Las formaciones más favorables pertenecen a materiales cretácicos, jurásicos y triásicos.

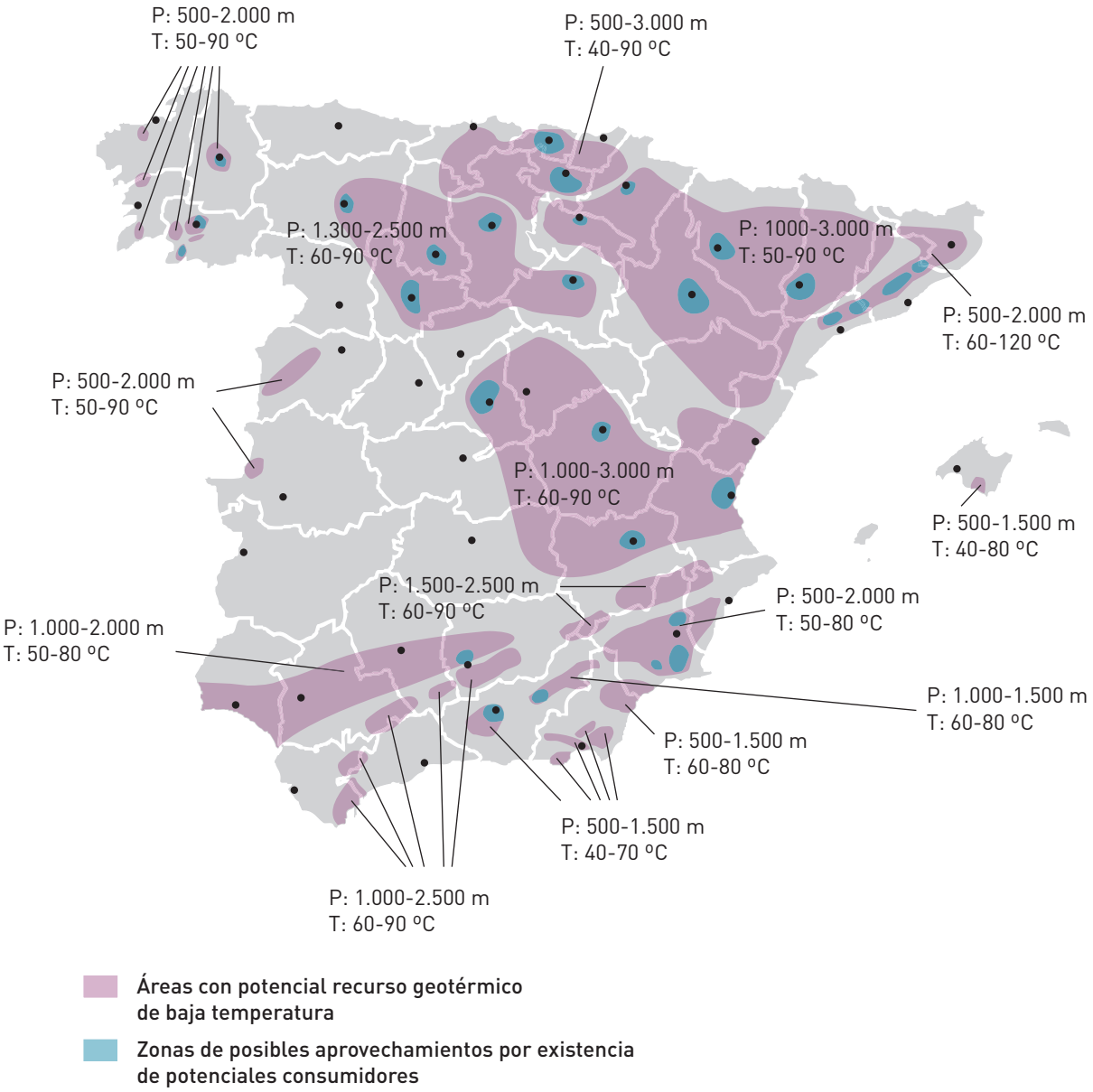
Las formaciones cretácicas favorables son las areniscas del Albiense (Utrillas) y los carbonatos del Cretácico Superior. Son los más extensos de la cuenca ocupando de orden de 27.500 km^2, con sus mínimos espesores al oeste donde la isopaca cero es una línea NNW-SSE que pasa al oeste de León y Valladolid, y con máximos desarrollos hacia el este donde puede llegar a superar los 500 metros de potencia. La profundidad varía desde los 1.200-1.300 metros en el área occidental hasta más de 2.000 metros en la zona oriental. La temperatura, función de la profundidad, varía desde unos 60 ºC bajo León y Valladolid hasta más de 80 ºC bajo la ciudad de Burgos. La salinidad del agua de formación también debe variar con la profundidad, siendo en general fluido geotérmico de elevada salinidad.

Las formaciones jurásicas favorables son fundamentalmente los carbonatos –dolomías– del Lías inferior-Rético, que con una extensión de unos 7.000 km^2 se presentan al este del meridiano coincidente con el límite occidental de la provincia de Burgos. Es más profundo que el cretácico, encontrándose habitualmente a profundidades superiores a 2.000 metros y con espesores de hasta 500 metros en la zona más oriental (SE de la provincia de Burgos y NW de la provincia de Soria). La temperatura es casi siempre superior a los 70 ºC y a menudo superior a los 80 ºC. El fluido contenido en estos almacenes es siempre de elevada salinidad.

La única formación triásica que puede constituir almacén geotérmico en la cuenca del Duero, es el conjunto de areniscas del Triásico inferior –Buntsandstein–, que en general tiene poca permeabilidad por lo que su potencial geotérmico es inferior al de las formaciones anteriores. Se presenta solo en el tercio oriental de la cuenca, con una extensión algo superior al Jurásico: 10.500 km^2, al coincidir su isopaca cero con un meridiano más occidental que el Jurásico. Se encuentra más profundo que el mismo, habitualmente a más de 2.500 metros, por lo que su temperatura es también superior -80 a 90 ºC en general–, conteniendo agua muy salada.

Los estudios de viabilidad técnico-económica realizados en la década de los ochenta –Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A. e Instituto Geológico y Minero de España–, permiten decir que los recursos geotérmicos de baja temperatura de la Cuenca del Duero podrían aprovecharse en el entorno de las ciudades de Burgos, León, Palencia, Soria y Valladolid. La información más detallada y precisa de esta cuenca corresponde al entorno de la ciudad de Burgos en cuyas proximidades –polígono industrial de Villalonquéjar– se realizaron en la década de los ochenta un sondeo profundo de evaluación y varios estudios de viabilidad.

Figura 7.34. Mapa de recursos geotérmicos de baja temperatura y zonas de posibles aprovechamientos



Cuenca del Ebro

Esta gran cuenca mesozoico-terciaria comprende dos extensas zonas geológicamente algo diferentes –Prepirineo y Valle del Ebro–, que para el análisis geotérmico pueden ser considerados conjuntamente.

En la zona más oriental de la cuenca, al este de la falla del Segre, el terciario en general poco potente se apoya sobre el Triásico que presentan sus dos formaciones permeables importantes: carbonatos de Muschelkalk y areniscas del Bunt. Están prácticamente ausentes Jurásico y Cretácico. En el Prepirineo de esta zona más oriental, tampoco existe Triásico, apoyándose los sedimentos Terciarios sobre el basamento hercínico del Pirineo Axial.

En la zona central de la cuenca existe siempre el Triásico bajo el relleno neógeno, tanto en el Prepirineo como en Valle del Ebro. Jurásico y Cretácico se encuentra también presente, el primero en la zona meridional de influencia de la Cordillera Ibérica, y el segundo en el Prepirineo, en su facies carbonatada de Cretácico superior.

Finalmente, en la zona más occidental de la cuenca, límite con la zona Cantábrica, existen materiales de los tres niveles mesozoicos: areniscas del Bunt, carbonatos del Jurásico (Lías y Malm), areniscas del Cretácico inferior y carbonatos de Cretácico superior. Debido al gran desarrollo del Terciario en esta zona –que afecta también al Cretácico– los almacenes pueden encontrarse a mucha profundidad, llegando a contener por su temperatura recursos de media temperatura –como se expondrá más adelante–, en lugar de los de baja temperatura. Lo mismo ocurre en la parte central del Prepirineo, donde la estructuración alpina permite encontrar carbonatos eocenos (Terciario inferior) y cretácicos a profundidades de más de 4.000 metros y temperaturas superiores a los 150 ºC.

Desde el punto de vista de los recursos geotérmicos de baja temperatura, a lo largo y ancho de toda la cuenca se encuentran formaciones permeables en profundidades de entre 1.000 y 3.000 metros, perteneciendo a cualquiera de los grandes paquetes estratigráficos presentes en la cuenca –Triásico, Jurásico, Cretácico y Terciario inferior–, con predominio de existencia de los materiales triásicos, especialmente las areniscas del Bunt que existen prácticamente en toda la cuenca, lo que no ocurre con las otras formaciones. Las temperaturas son muy variables en función de la profundidad del lugar, desde los 50 ºC hasta los 90-100 ºC. En la cuenca del Ebro, salvo algunas excepciones, los fluidos geotérmicos son muy salinos, alcanzando en algunos emplazamientos de la zona central concentraciones cercanas a la saturación (>100.000 mg/l).

Los estudios de viabilidad técnico-económica han puesto en evidencia posibilidades de aprovechamiento de los recursos de baja entalpía en los entornos urbanos de Zaragoza, Lleida, Huesca y Jaca, pudiendo incluirse también Pamplona y Logroño.

Cuenca Tajo-Mancha-Júcar

Esta extensa zona constituye la gran cuenca intramontañosa central de la Península Ibérica. Limitada al NW, W y SW por los materiales paleozoicos del Macizo Hercínico, al NE por la Cordillera Ibérica, al SE por la Cordillera Bética y al E por el mar Mediterráneo. Los mayores desarrollos y espesores de materiales permeables de todos los niveles estratigráficos mesozoicos se presentan hacia el este, acuñándose todos hacia el oeste, cuyo límite, isopaca valor cero, para casi todas las formaciones mesozoicas coincide a grandes rasgos con una línea más o menos norte-sur, entre Madrid y Guadalajara. La excepción son los materiales carbonatados del Cretácico superior que llegan a existir al oeste de Madrid.

Las formaciones permeables de interés geotérmico en esta cuenca se encuentran a profundidades muy variables desde 1.000 a 3.000 metros. Las zonas más profundas se localizan en las proximidades del Sistema Central donde el relleno del Terciario puede llegar a alcanzar los 3.000 metros en algunos puntos, así como en la zona costera próxima a Valencia donde el Triásico puede encontrarse a profundidades de más de 2.500 metros. La temperatura varía asimismo en función de esta profundidad entre los 60 y 90 ºC.

Los materiales triásicos (areniscas del Bunt y carbonatos de Muschelkalk) presentan potencias variables desde 0 a su límite occidental hasta los 400-500 metros en la zona central y oriental. Su profundidad es muy variable a lo ancho de la cuenca, desde menos de 1.000 metros en los límites sur de la misma (proximidades de los materiales de Cordillera Bética) hasta más de 3.000 metros en las proximidades del Sistema Central (norte de Guadalajara) y de Valencia. Esta variabilidad en la isobata afecta a la variación de temperatura, que pueden oscilar desde menos de 60 ºC en zonas más superficiales, a más de 90 ºC en las áreas profundas.

El conjunto de materiales jurásico presenta una gran variación de potencia desde la isobata cero en su límite occidental hasta espesores de más de 1.400 metros en algunas zonas entre Albacete y el Júcar. Es un conjunto de materiales permeables muy favorable para la existencia de recursos geotérmicos, si bien en una gran parte de la cuenca se encuentra poco profundo o aflorante, y por lo tanto a temperatura más baja. Las zonas más profundas se encuentran en las cuencas altas de los ríos Júcar y Tajo, así como al sur de la ciudad de Valencia. Con temperaturas también muy variables desde menos de 50 ºC hasta 70-75 ºC, presenta fluidos de salinidad variable, llegando en las zonas menos profundas a contener agua dulce –como ocurre con todas las formaciones permeables de esta cuenca.

El conjunto de formaciones permeables del Cretácico –arenas del Albiense (Utrillas) y carbonatos del Cretácico superior– está ampliamente representado en el subsuelo de esta cuenca, desde el oeste y norte de Madrid, donde se presentan a profundidades de más de 3.000 metros y espesores entre cero y doscientos metros, hasta la costa mediterránea, al Sur de la provincia de Valencia dónde puede alcanzar puntualmente potencias de más de 2.000 metros. Presentan afloramientos en gran parte de la cuenca, por lo que en general es poco profundo, con temperaturas relativamente bajas de 50 a 70 ºC y fluido geotérmico de baja salinidad. La excepción es la parte norte de la cuenca del Tajo –Subcuenca de Madrid– dónde el Cretácico se presenta depositado sobre el zócalo o basamento paleozoico-terciario, a profundidades superiores a los 3.000 metros conteniendo fluidos muy salados de temperatura elevada (140-150 ºC) y por lo tanto recursos geotérmicos de media temperatura.

Por último, las formaciones de arenas y areniscas del Terciario, han sido muy estudiadas e investigadas en la subcuenca de Madrid donde a profundidad de 1.500-2.000 metros contienen fluidos geotérmicos de 70-85 ºC y elevada salinidad.

Los estudios de viabilidad llevados a cabo en el pasado ponen en evidencia el interés de posibles aprovechamientos en Madrid –es una de las zonas mejor conocidas tanto desde el punto de vista del recurso disponible como de los potenciales consumidores–, Cuenca y Albacete. Hay que sumar a esta zona el entorno geográfico de la ciudad de Valencia por un importante desarrollo económico y el potencial de recursos presente.

Cuenca del Guadalquivir

La depresión o cuenca terciaria del Guadalquivir está intercalada entre el Macizo Hercínico de la Meseta al norte y las Cordilleras Béticas al sur. De forma triangular con un vértice oriental en el área de la Sierra de Cazorla y Lomas de Úbeda y la base opuesta en el Golfo de Cádiz. Los materiales de ambos límites se encuentran en su subsuelo, subyacentes al relleno neógeno, el Paleozoico y Orla Mesozoica de la Meseta desde el norte y el Mesozoico Subbético desde el sur.

Los materiales permeables de estas formaciones, especialmente los carbonatos jurásicos del Mesozoico de la meseta, forman junto al Mioceno Basal del relleno terciario de la cuenca los almacenes geotérmicos de la cuenca del Guadalquivir.

El Mioceno Basal del Guadalquivir constituido por arenas, areniscas y conglomerados (a veces calcarenitas) se encuentran en toda la cuenca a profundidades variables desde el afloramiento en el contacto con la meseta hasta profundidades mayores de 1.000 metros en el límite sur. Su temperatura varía por lo tanto desde menos de 40 ºC en algunas zonas hasta 60 ºC en las zonas más profundas. Su potencia variable es, salvo excepciones, inferior a 100 metros por lo que su interés no es elevado.

Bajo el Mioceno Basal en las Zonas Orientales (Jaén) y Occidentales (Huelva) se presenta el Jurásico carbonatado de la Meseta, a profundidades variables, desde menos de 1.000 metros en los sectores más próximos a la Meseta hasta más de 3.000 metros en las proximidades del límite subbético, donde contienen fluido muy caliente, como ocurre en el área de Lebrija donde el sondeo Bética 14-1 lo ha perforado a 3.480 metros de profundidad y 150 ºC de temperatura, constituyendo en este caso un recurso de media temperatura, como se comentará más adelante.

Esta formación jurásica puede estar ausente en el Sector Central de la Cuenca –provincias de Sevilla y Córdoba– por erosión. Constituye a poca profundidad, en el norte de la provincia de Jaén, un importante acuífero explotado para aprovechamientos agrícolas. La temperatura en esta zona es menor de 30 ºC.

En algunos puntos de la cuenca (Huelva y Jaén), se puede encontrar bajo las formaciones carbonatadas el Jurásico, los materiales detríticos del Triásico, que podrían, puntualmente dependiendo de la permeabilidad, constituir almacenes geotérmicos de baja temperatura (60-70 ºC).

Cuenca Norte-Cantábrica

En esta cuenca se presenta una prolongada sedimentación de materiales desde el Paleozoico hasta el Terciario, con un gran desarrollo vertical de algunas formaciones, especialmente Cretácico y Terciario. Por ejemplo, en algunos puntos de la Cubeta Vizcaína se llegan a acumular más de 5.000 metros de materiales cretácicos y en el Surco Terciario de La Rioja, se han depositado hasta 4.000 metros de sedimentos continentales.

En general las formaciones aptas para ser consideradas almacenes geotérmicos de baja temperatura se encuentran a profundidad de 500-3.000 metros y las temperaturas varían de 40 a 90 ºC, en función de la profundidad.

Como en otras áreas ya comentadas, el gran desarrollo vertical de algunas formaciones permite que determinados materiales permeables, se presenten en más de 3.500 metros, con lo que pueden contener recursos geotérmicos de media temperatura, y así se comentará en el apartado correspondiente.

En la Cuenca Cantábrica, las formaciones seleccionadas como almacenes geotérmicos son las siguientes:

- Areniscas y conglomerados del Triásico Inferior, con potencia de 200 a 600 metros, se encuentran en general muy profundos debido a los grandes espesores cretácicos que los recubren.
- Carbonatos del Jurásico (Rético-Lías) que mientras en los anticlinales constituyen acuíferos de agua dulce, en los sinclinales se encuentran muy profundos conteniendo fluido geotérmico caliente y salado. En algunos sondeos petrolíferos se han cortado en estas áreas a unos 4.000 metros con temperaturas superiores a 100 ºC.
- Materiales detríticos y carbonatados del Cretácico. Dado el gran desarrollo vertical del cretácico existen numerosos niveles permeables que pueden constituir almacenes geotérmicos tanto de baja temperatura –profundidad menor de 3.000 metros– como de media temperatura –profundidad mayor de 3.000-3.500 metros–, como en zonas del norte de la provincia de Burgos y suroeste y sureste de la provincia de Álava, donde el techo del Albiense se encuentra a profundidades mayores de 3.500 metros.

Hay que señalar la complejidad tectónica de la cuenca Cantábrica, donde se superponen la influencia de la orogenia alpina con la proliferación de fenómenos diapíricos que afectan directamente a la geometría y disposición de las formaciones del subsuelo.

7.3.3 Otras zonas

En este apartado se incluyen las áreas de interés geotérmico seleccionadas en diferentes estudios e informes realizados por el IGME, principalmente en el periodo 1975-1990, y que no están incluidas en las denominadas grandes cuencas sedimentarias que se acaban de describir en el apartado anterior. Fundamentalmente son las zonas ubicadas en las cordilleras periféricas: Costero-Catalanas y Béticas, así como dispersas en el Macizo Hercínico –sobre todo en Galicia. El factor geológico que caracteriza este conjunto de zonas es la fracturación regional que afecta a dichos dominios geológicos y que favorece la circulación más o menos profunda del agua con la consiguiente elevación de su temperatura.

Asimismo es común en estas zonas la superposición de almacenes geotérmicos a diferentes profundidades y por lo tanto diferentes temperaturas, de forma que en numerosos casos, bajo los recursos geotérmicos de baja temperatura aquí descritos, existen en la misma vertical otros recursos de un rango térmico superior que pueden considerarse de media temperatura, y serán descritos en un capítulo posterior.

Cordilleras Costero-Catalanas

En el ámbito geológico de este sistema montañoso, existe una serie de fosas tectónicas, originadas en la fase distensiva que sigue a la orogenia alpina, y que forman parte del sistema distensivo que desde Centro Europa (fosa del Rhin) se prolonga por el SE de Francia y todo el levante de la Península Ibérica hasta el SE de la misma.

Un rasgo común a estas fosas o depresiones de Cataluña es la presencia de importantes fallas de borde que siempre afectan tanto al sustrato mesozoico de la misma como a los materiales paleozoicos o ígneos más profundos. Estas fallas de bordes, llevan asociadas una franja de material muy triturado (milonitización), con elevada permeabilidad, que habitualmente alberga agua caliente, con abundantes manifestaciones superficiales –aguas termales– con temperatura de surgencia a veces superior a los 60 ºC.

En las zonas profundas de dichas fallas de borde –entre 500 y 2.000 metros– se almacenan y circulan fluidos geotérmicos de baja o media salinidad (menos de 10.000 mg/l de sales disueltas) y elevada temperatura 60-90 ºC. Los estudios geotérmicos realizados por el IGME precisan que esa temperatura puede superar los 120 ºC en algunas zonas.

El almacenamiento de fluido geotérmico en la falla de borde no es el único tipo de yacimiento geotérmico contemplado en estas áreas. También se ha investigado y puesto en evidencia la existencia de almacenes geotérmicos en materiales sedimentarios instalados en el fondo de las mencionadas fosas tectónicas, como ocurre en las de Olot, Ampurdán, Penedés o Reus, donde materiales mesozoicos o del Eoceno albergan fluidos de elevada temperatura.

El rango de profundidades en todos los casos se encuentra entre 500 y 2.000 metros y las temperaturas entre 60 y 120 ºC. En algunos casos, como las depresiones del Vallés en Barcelona y La Selva en Gerona, el recursos geotérmico se encuentra ubicado en la franja de milonitización de fracturas del sustrato granítico, que en determinados puntos y por efecto de un incremento de permeabilidad invade las formaciones detríticas de borde de fosa (arcosa), por lo que los sondeos que las atraviesan extraen agua caliente de las mismas.

De NE a SW la sucesión de zonas geotérmicas puede establecerse de la forma siguiente: Olot, Ampurdán y La Selva en Gerona; Vallés en Barcelona; Penedés en Barcelona y Tarragona; Valls-Reus en Tarragona. Los estudios de viabilidad y de detalle realizados por el IGME y otras entidades permiten definir algunas áreas como favorables a un posible aprovechamiento: Vallés-Samalús, Vallés-San Cugat, Penedés, Reus y Montbrió del Camp.

Cordilleras Béticas

Las Cordilleras Béticas constituyen un orógeno alpino, levantado fundamentalmente durante el Mioceno inferior y medio, pero en el que la actividad tectónica ha continuado hasta tiempos muy recientes y ha estado acompañada de manifestaciones eruptivas de distinta índole. Esta región es ámbito de una elevada concentración de manifestaciones termales, especialmente en su área más oriental (Granada, Almería y Murcia). Dos son las causas que pueden justificar esta elevada concentración: por un lado la presencia abundante de almacenes o formaciones permeables de diferente índole y profundidad, y por otro lado la abundancia de fallas y fracturas regionales de gran trazado y envergadura vertical que alcanzan los almacenes más profundos, poniéndolos en comunicación con los más superficiales. En este sentido la abundancia de manifestaciones termales es una expresión de la existencia de recursos geotérmicos en formaciones permeables profundas.

Las áreas seleccionadas como geotérmicas en diferentes informes y estudios del IGME en las Cordilleras Béticas, pueden clasificarse en dos tipos básicos: áreas localizadas en los apilamientos de materiales carbonatados de diferente origen y situación: Prebético, Subbético y Bético interno, y áreas localizadas en las denominadas Depresiones Internas, fosas tectónicas en su mayoría, constituidas durante el periodo distensivo que siguió a la formación del Orógeno.

Al primer tipo pertenecen las zonas del Prebético de Murcia, Subbético de Andalucía Occidental o Subbético y Zonas Internas de Murcia, mientras que al segundo tipo pertenecen las depresiones existentes en las provincias de Granada, Almería, Murcia e Islas Baleares.

Las primeras van asociadas a áreas de tipo montañoso, por lo que difícilmente encontrarán en su ámbito de existencia un conjunto suficientemente importante de consumidores que permita su aprovechamiento. Sin embargo, las segundas llevan aparejado una importante actividad económica, lo que puede garantizar la existencia de futuros consumidores.

Entre las zonas del subbético de Andalucía Occidental se pueden enumerar las siguientes:

- Zona de Algeciras-Manilva en el extremo suroccidental de la provincia de Málaga y límite con Cádiz. Se encuentran recursos de 60-90 ºC y profundidades de 1.000-2.500 metros, contenidos en materiales carbonatados del subbético. Una parte de esta área coincide con los centros industriales de La Línea-Algeciras por lo que podrían tener aprovechamientos futuros.
- Zonas subbéticas de las provincias de Cádiz, Sevilla, Córdoba y Jaén, en las proximidades de sus límites con Málaga y Granada respectivamente. Presentan recursos geotérmicos en carbonatos jurásicos (calizas y dolomías) del subbético, a profundidades muy variables según las zonas, desde los 1.000-1.500 m de Jaén y Córdoba a los 2.000-2.500 m de Cádiz y Sevilla. Las temperaturas estimadas superan los 60 ºC, pudiéndose puntualmente alcanzar y superar los 80 ºC. En ninguna de las cuatro zonas existe una demanda de calor importante actualmente.

En la provincia de Murcia se pueden enumerar las siguientes zonas:

- Zona Subbética y Bética interna de Murcia incluyendo las áreas de Bullas, Archena y Fortuna en las primeras y Sierra del Sur de Murcia (Águilas-Mazarrón), Carrascoy y Cartagena en las segundas. Las profundidades de los posibles almacenes varían de 500-2.000 metros y temperaturas de 50-80 ºC. Los balnearios de Fortuna y Archena se presentan como posibles aprovechamientos de esta zona.
- Zona de Prebético de Murcia, en la que se incluyen las formaciones permeables de las arenas de Prebético Meridional, Moratalla, Calasparra y

Cieza, constituidos por materiales carbonatados del Cretácico principalmente. Las profundidades de los almacenes son del orden de 1.500-2.500 m y la temperatura de 60-90 ºC.

En cuanto a las Depresiones Internas con factores y características geológicas y geométricas muy comunes cabe citar las siguientes: Depresión de Granada y Depresión de Guadix-Baza en la provincia de Granada, Depresiones de Campo de Dalías, Medio y Bajo Andarax, Rio Sorbas, Níjar y Vega Baja de Almanzora y Huercal-Overa en la provincia de Almería, Depresión de Guadalentín, Mazarrón, Cartagena y Cuenca de Mula en la provincia de Murcia, y finalmente, la Depresión de Llucmayor en la isla de Mallorca. En todas ellas pueden existir recursos geotérmicos de 40-80 ºC entre 500 y 1.500 metros de profundidad, contenidos en materiales de la base del Terciario (calcarenita, areniscas y conglomerados) o en las formaciones mesozoicos que lo subyacen en todas las depresiones. Posibles aprovechamientos pueden existir en todas ellas, pero sobre todo son importantes las posibles explotaciones en Granada, Campo de Dalías, Campo de Cartagena, Cuenca de Mazarrón y Depresión de Llucmajor.

Galicia y otras áreas de Salamanca y Cáceres

Los estudios llevados a cabo por el IGME de las manifestaciones termales de Galicia, Salamanca y Cáceres, pusieron en evidencia la existencia de recursos geotérmicos de baja temperatura asociados a las fracturas regionales que ocasionalmente pueden estar muy relacionadas con las manifestaciones termales, pero que regionalmente existen con independencia de dichas manifestaciones.

El rango de profundidades establecido en los estudios del IGME es siempre de 500-2.000 metros y la temperatura de 50-90 ºC, si bien a menudo (Lugo-Ourense-Molgas-Rio Caldo, entre otros) la temperatura estimada en profundidad supera los 100-110 ºC, alcanzando los 130 ºC en algunos casos. Esto constituye ya claramente un recurso geotérmico de media temperatura.

Hay que señalar que a menudo las fracturas a las que se encuentran asociados los recursos tienen una evidente relación con cursos fluviales cuyas aguas a veces encubren posibles manifestaciones. A pesar de la proximidad de río y recursos geotérmicos, ensayos realizados por el IGME evidencian una completa independencia de unos y otro. Esto lleva a interpretar que los circuitos de salida del recurso geotérmico (fracturación comunicada con almacenes profundos) no están conectados con los circuitos de infiltración y entrada del agua de lluvia y de los ríos hasta los almacenes profundos.

La geotermometría isotópica realizada sobre muestras de algunas manifestaciones termales parecen indicar la existencia de unos almacenes a temperatura del orden de 200 ºC, lo que solo sería posible a una profundidad mucho mayor de la que se supone a los anteriormente comentados, quizás del orden de 4.000-5.000 metros, pero probablemente de escasa permeabilidad. Estos almacenes podrían constituir futuros objetivos de proyectos EGS, como se comentará posteriormente.

Se tiene pues, que para una misma zona, a diferentes profundidades existirían recursos de diferentes tipos: baja temperatura, media temperatura y posible EGS.

Las áreas en que, de acuerdo con la documentación del IGME, existen los recursos de baja temperatura son los siguientes: Arteixo y Loureda en A Coruña, Caldas-Cuntis y Caldela de Tuy en Pontevedra, ciudad de Lugo en Lugo, Ourense, Ribadavia, Prexigueiro, Baños de Molgas-Xunqueira de Ambia y Rio Caldo en la provincia de Ourense, Depresión de Ciudad Rodrigo y zonas limítrofes en Salamanca y finalmente zonas puntuales al oeste de Cáceres, junto al embalse de Alcántara (Ceclavin-Balneario de las Cañas).

7.4 RECURSOS GEOTÉRMICOS DE MEDIA TEMPERATURA

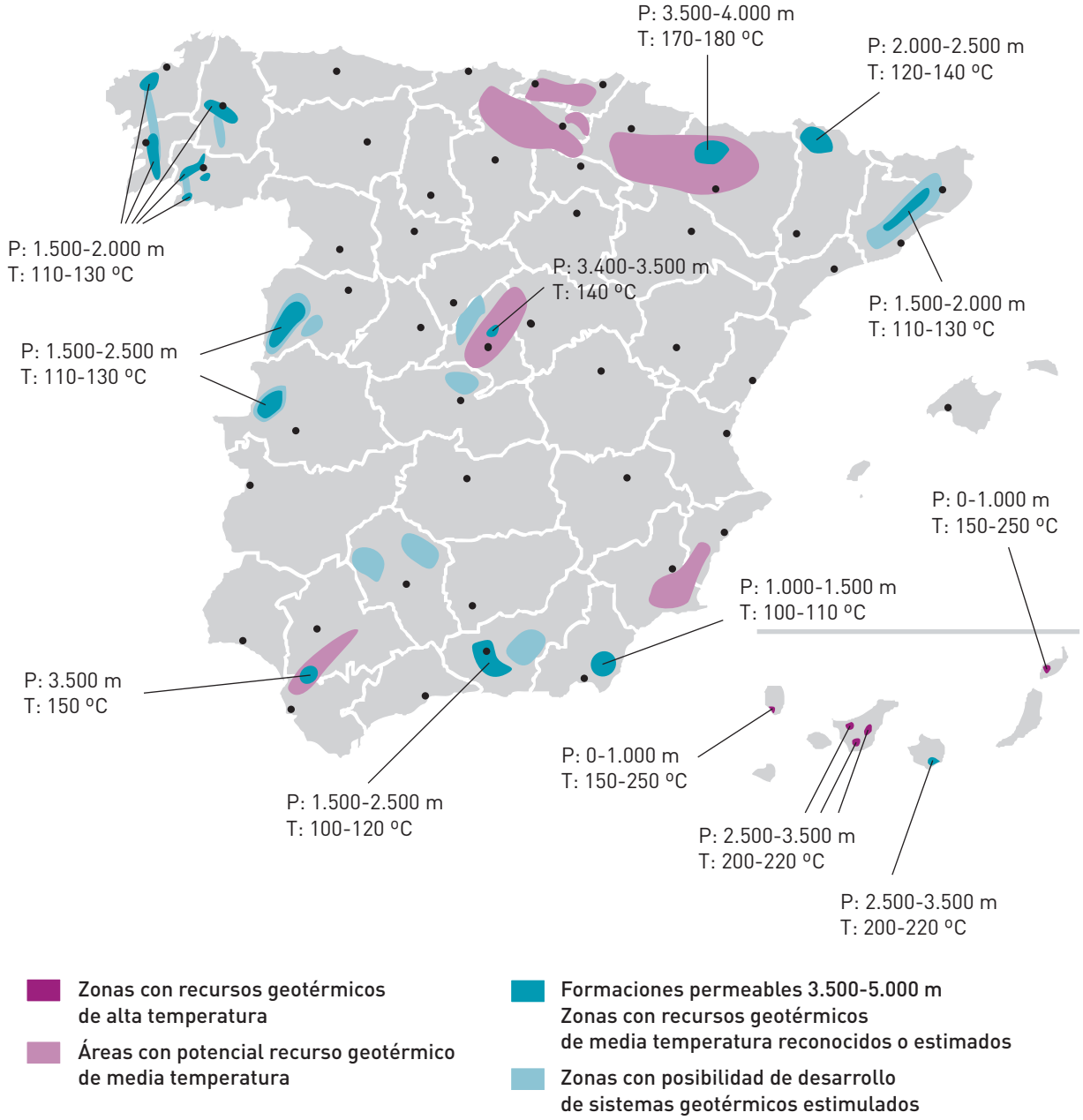
De acuerdo con la clasificación establecida en el apartado 5.1.4, los recursos geológicos de media entalpía o media temperatura son aquellos cuya temperatura se encuentra en el rango de 100-150 ºC. Se localizan en las cuencas sedimentarias con gradiente geotérmico normal a profundidades del orden de 3.500-4.000 metros, mientras que en áreas de gradiente geotérmico anómalo pueden encontrarse a profundidades del orden de 2.000 metros.

Su temperatura permite el uso para producción de electricidad mediante ciclos binarios, si bien están siendo utilizados cada día más en procesos combinados de producción de electricidad y sistemas centralizados de calor –*district heating*– lo que permite mejorar el rendimiento económico de la explotación.

De acuerdo con la información incluida en la abundante documentación consultada, es posible delimitar en España, dos tipos de zonas o áreas de recursos geotérmicos de media temperatura. Estas áreas y zonas se han plasmado en la Figura 7.35 que incluye un mapa de los recursos geotérmicos de media y alta temperatura y posibles sistemas geotérmicos estimulados de España.

Por una parte existen áreas en las que por la información geológica regional, de prospección de hidrocarburos –geofísica y sondeos–, estudios para almacenamiento de gas, etc., es posible asignar potenciales recursos geotérmicos de media temperatura ya que la existencia de formaciones permeables a profundidades de 3.500-5.000 metros es factible y probable. Son las denominadas áreas con potenciales recursos geotérmicos de media temperatura que no han sido investigadas en detalle hasta la fecha. Las más importantes, tras el análisis documental mencionado, se podrían localizar en las siguientes zonas:

Figura 7.35. Mapa de recursos geotérmicos de media y alta temperatura y posibles sistemas geotérmicos estimulados



- Grandes sinclinales del País Vasco y norte de Burgos y La Rioja, en los que materiales permeables mesozoicos como areniscas del Bunt, carbonatos del Jurásico, arenas y calizas cretácicas pueden encontrarse a profundidades superiores a 3.500 metros, alcanzando puntualmente los 5.000 metros, con lo que su temperatura superará con seguridad los 100-120 ºC.
- Área occidental de Prepirineo, abarcando zonas de Huesca, Zaragoza y Navarra, donde el mismo tipo de materiales antes comentado se encuentra también a profundidades de 3.500-4.500 metros. Dentro de esta gran área se encuentra la zona de Jaca que se detallará posteriormente, por haberse confirmado en ella la existencia de dichas formaciones permeables.
- Área norte de la cuenca de Madrid-Guadalajara, donde la investigación sísmica desarrollada a principios de los ochenta permitió delimitar almacenes carbonatados cretácicos a profundidades de 3.500-4.000 metros. La realización posterior de un sondeo petrolífero permitió confirmarlo.
- Área sur de la Depresión del Guadalquivir entre Sevilla y Cádiz. La prospección sísmica situaba los materiales carbonatados de la Orla Mesozoica de la Meseta (Jurásico) a profundidades de más de 3.500 metros. La perforación en 1985 del sondeo Bética 14-1 en el municipio de Lebrija permitió confirmar esta hipótesis.
- Área de Bética Interna en la provincia de Murcia y Sur de Alicante, donde la geología regional y la prospección de hidrocarburos –gravimetría, sísmica y primeros sondeos de prospección– permiten situar formaciones almacén carbonatadas del Bético Interno (mármoles y dolomías triásicas) a profundidades de más de 2.500 metros en una zona con anomalía de gradiente geotérmico.

Por otra parte existen zonas concretas, más reducidas en sus dimensiones en las que la prospección realizada, bien estudios geotérmicos o bien sondeos de hidrocarburos, permite localizar recursos de media temperatura, que pueden en este caso ser catalogados como recursos reconocidos o estimados, y por lo tanto con un grado de certidumbre o precisión bastante mayor que las áreas anteriormente comentadas. Estas zonas, delimitadas en el mapa de la Figura 7.35, se enumeran a continuación:

- Jaca-Sabiñánigo. Ya comentada anteriormente. Los almacenes carbonatados del Eoceno-Paleógeno se encuentran a 3.500-4.500 metros de profundad y temperaturas calculadas de 170-180 ºC. Este rango de temperatura permitiría clasificarlas como un yacimiento hidrotermal de alta temperatura, si bien en el presente informe se le incluye en este grupo de media entalpia.
- Cuenca de Madrid. Ya comentada anteriormente también. Los carbonatos cretácicos se encuentran a profundidades de 3.400 metros y 140 ºC de temperatura. Los datos de permeabilidad medidos fueron muy bajos, lo que induce a pensar que para producción deberá someterse a un proceso de estimulación (posible EGS de temperatura media).
- Lebrija. También analizada anteriormente. El sondeo Bética 14-1 perforó los carbonatos jurásicos muy vacuolares y permeables, a profundidades de 3.450-3.500 metros. Registros termométricos posteriores permiten asignar una temperatura de 150 ºC a este almacén.
- Cuenca de Granada-Lanjarón. Los estudios llevados a cabo por el IGME, permiten con la aplicación de estudios geológicos de detalle y prospección geotermométrica, apoyados en estudios geofísicos más amplios, la predicción de existencia de formaciones permeables –mármoles y dolomías Alpujárrides y Nevado-Filábrides– a profundidades de 1.500-2.500 metros y temperaturas estimadas de 100-120 ºC.
- Zona de Sierra Alhamilla (Almería). Como en la anterior, los estudios llevados a cabo por el IGME permiten predecir la existencia de formaciones permeables –mármoles Nevado-Filábrides– a profundidades de 1.000-1.500 metros y temperaturas de 100-110 ºC, con buenas características hidrodinámicas.
- Zona de La Selva-Vallés (Costero-Catalanas) y Pirineo Axial. Como ya se ha comentado anteriormente, bajo los posibles almacenes de baja temperatura, existentes en las fallas de borde de las depresiones de La Selva en Gerona y Vallés en Barcelona, pueden existir recursos de media temperatura. Los estudios geotérmicos y el análisis del gradiente geotérmico en los sondeos de prospección realizados, permiten estimar temperaturas de 110-130 ºC en las zonas de falla a profundidades de 1.500-2.000 metros. En la zona del Pirineo Axial, los estudios realizados por el IGME permite el mismo tipo de conclusión.
- Zonas de Galicia-Salamanca-Extremadura. Lo dicho para el caso de Cataluña es aplicable también a las zonas de Galicia-Salamanca-Extremadura, como ya se comentó anteriormente. En las zonas de falla, en las que superficialmente existen recursos de baja temperatura –60-80 ºC– es posible predecir mediante los estudios realizados

la presencia de recursos de media temperatura 110-130 ºC a profundidades mayores de 1.500-2.000 metros. Estas zonas son: Arteixo-Loureda, Caldas-Cuntis-Caldelas de Tuy, Lugo, Ourense-Ribadavia, Baños de Molgas, Xunqueira de Ambia y Rio Caldo en Galicia, Ciudad Rodrigo en Salamanca y Ceclavin en Cáceres. Asegurándose la no interferencia con las actuales explotaciones termales, estas zonas de media temperatura podrían ser objeto de proyectos de explotación geotérmica con la producción de electricidad mediante ciclos binarios.

7.5 RECURSOS GEOTÉRMICOS DE ALTA TEMPERATURA

Los recursos geotérmicos de alta temperatura, se encuentran habitualmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados, a profundidades muy variables de 1.500-3.000 metros. Las condiciones de existencia de yacimientos de alta temperatura, según la literatura convencional, son: existencia de un foco activo de calor próximo a la superficie de la tierra, existencia de una formación permeable capaz de contener y transmitir fluido geotérmico y finalmente, presencia de una capa confinante-impermeable que impida el escape de la energía. Constituidos por vapor o, lo que es más habitual, mezcla de agua y vapor, se aprovechan para producir electricidad.

La presencia de recursos geotérmicos de alta temperatura está habitualmente ligada a la existencia de importantes anomalías de calor en áreas de elevada inestabilidad geológica. Esta inestabilidad se traduce en la presencia de fenómenos geológicos singulares como **elevada actividad sísmica, formación de cordilleras y orógenos recientes, abundancia de manifestaciones termales** y, finalmente, **actividad volcánica y/o plutónica**.

Parte de estos fenómenos geológicos tienen lugar en abundantes puntos de España, pero sólo en un lugar existe actividad magmática actual: las Islas Canarias.

Ya en el apartado anterior ha quedado expuesto la posible presencia de almacenes geotérmicos de elevada temperatura (T>150 ºC) en algunas áreas por su gran profundidad (zonas del Prepirineo-Jaca, algunas zonas de la cuenca Cantábrica, Galicia, etc.). Sin embargo estos recursos no se consideran como de alta entalpía en su sentido más convencional. En todo caso entrarán en el moderno concepto de **recursos hidrotermales profundos de alta temperatura**. En su concepción más convencional los recursos de alta temperatura son los ligados a la existencia de actividad magmática.

El análisis de la documentación existente en el IGME pone de relieve la presencia de condiciones apropiadas para la existencia de recursos geotérmicos de alta entalpía en la Isla de Tenerife. Estudios realizados en las islas de Lanzarote y La Palma, han puesto en evidencia la existencia de fuertes anomalías térmicas superficiales, con temperaturas que superan los 300 ºC. El estudio detallado de estas zonas revela que las anomalías están asociadas a la circulación profunda de aire, en las proximidades de una cámara magmática en proceso de enfriamiento lo que unido a un pequeño aporte de gases (CO_2) de dicha cámara origina la anomalía citada. Ambos casos han sido catalogados como **Recurso de Roca Caliente Seca** muy superficial, ya que el análisis de los gases emitidos en estas zonas revela a ausencia total de agua o vapor en profundidad.

El potencial energético estimado en el caso más relevante –Lanzarote– alcanza varios centenares de kilovatios, de difícil aprovechamiento en la práctica, pero que, no obstante, se ha propuesto en dichos estudios ser sometidos a una investigación tecnológica mediante un proyecto piloto de pequeña dimensión.

El caso de Tenerife es diferente, ya que se ha seguido en su investigación una metodología clásica, con aplicación de técnicas geológicas, volcanológicas, geoquímicas, geofísicas, etc.

La conclusión de los estudios realizados, y terminados en la década de los noventa, es la probabilidad de existencia de yacimientos de alta entalpía en diversas áreas de la isla, localizados en la Dorsal NE – zonas altas de Arico-Fasnia, Dorsal NW – zonas altas de Icod-Santiago del Teide y área Sur asociada a una posible tercera Dorsal NS – zonas de Vilaflor-Granadilla de Abona. La temperatura estimada de estos recursos por los estudios geotermométricos es superior a los 180 ºC, pudiendo alcanzar los 200-220 ºC. En este punto conviene destacar la dificultad de aplicación de técnicas geotermométricas convencionales, ya que las posibles manifestaciones de escapes de fluidos geotérmicos del almacén, se ven enmascaradas por un importante flujo subterráneo somero de

agua fría de recarga pluvial. De forma que las aguas muestreadas y analizadas, son siempre mezclas de aguas superficiales infiltradas con pequeños aportes de escapes profundos (identificados por la presencia de indicios de sulfatos, cloruros, sílice y abundante flujo de CO_2 endógeno).

Las prospecciones geofísicas llevadas a cabo –principalmente campañas de investigación magnetotelúricas– ponen en evidencia la existencia de capas muy conductoras a profundidades de 1.500-2.500 metros, lo que puede constituir el *"cap rock"*, o formación impermeable confinante del almacén de vapor o fluido hidrotermal. Las investigaciones realizadas recientemente (2009) parecen confirmar estas conclusiones.

Las investigaciones de décadas pasadas, concluyeron con la perforación de un sondeo de investigación de pequeño diámetro en una de las zonas mencionadas –Dorsal NW–. Este sondeo perforó en sus últimos sesenta metros una capa impermeable de basaltos antiguos muy alterados hidrotermalmente. El gradiente geotérmico en estos sesenta metros es muy próximo a 100 ºC/km.

Todo ello confirma la probable presencia de yacimientos geotérmicos de alta temperatura en varios puntos de la isla. Sin embargo, no ha podido determinarse, por ahora, la profundidad y la permeabilidad de la formación almacén, que debe estar constituida por materiales volcánicos fracturados en el entorno del sistema de fracturas asociadas a la dorsal correspondiente. Esta es la labor y objetivo de las investigaciones que se proponga en el futuro próximo.

7.6 RECURSOS DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS ESTIMULADOS (EGS)

Los sistemas geotérmicos estimulados (EGS) constituyen una variedad en la evolución del concepto clásico de yacimientos de roca caliente seca (*Hot Dry Rock* – HDR), producido tras más de veinte años de investigación en este concepto de recurso geotérmico. Un almacén de roca caliente seca (HDR) puede crearse artificialmente mediante fracturación de masas de roca dura de escasa o nula permeabilidad. La elevada temperatura de estos yacimientos puede ser causada por la presencia de un foco de calor próximo –zona anómala– y por lo tanto existirá a profundidades de 2.000-2.500 metros o bien por simple acción del gradiente geotérmico normal, con lo que existirá a profundidades del orden o superior a 5.000 metros. La posibilidad de existencia previa de fracturación regional de gran envergadura y profundidad, con baja permeabilidad que impide la extracción de fluido, conduce a la creación del concepto de sistema geotérmico estimulado (EGS). En estas zonas con fracturación profunda pero baja permeabilidad pueden aplicarse conceptos de desarrollo de yacimientos de HDR, para estimular y mejorar la permeabilidad de la región fracturada, de forma que pueda crearse un circuito de extracción de calor mediante dobletes inyección-extracción y utilización de un fluido (agua) externo. Así pues, se puede decir que un sistema geotérmico estimulado (EGS) es un yacimiento de roca caliente seca (HDR) en el que la fracturación ya existe y debe mejorarse la permeabilidad artificialmente.

En una zona de gradiente geotérmico normal –30 ºC/km–, la temperatura alcanzada a 5.000 metros apenas alcanza los 165-170 ºC, pero si existe un gradiente ligeramente anómalo de 40-45 ºC/km, la temperatura ya supera los 200 ºC a una profundidad de 4.500 metros, lo que es más favorable para una explotación geotérmica.

De acuerdo con el modelo expuesto y con los criterios actuales de la tecnología, las condiciones para el desarrollo de un sistema geotérmico estimulado (EGS) se pueden resumir en lo siguiente:

- Existencia de masa de roca dura, granítica o metamórfica con baja permeabilidad en su matriz.
- Existencia de fracturación regional, preferentemente de tipo distensivo y que afecte a la masa de roca.
- Existencia de un cierto grado de anomalía.

Finalmente, según algunos sectores de la industria geotérmica, es también necesaria o muy favorable la presencia de una importante masa de sedimentos impermeables cubriendo la zona de interés, que permite el mantenimiento de las condiciones térmicas del sistema.

Una revisión detenida de la geología peninsular, a la vista de los criterios mencionados permite seleccionar un conjunto de zonas con posibilidades objetivas para el posible desarrollo de sistemas geotérmicos estimulados. A continuación se relacionan y describen brevemente estas zonas:

- Fosas tectónicas de La Selva y Vallés, en Gerona y Barcelona respectivamente. En los bordes de estas depresiones, las grandes fracturas de dirección preferente NW-SW, tienen su origen en la distensión postalpina y presentan una gran envergadura tanto longitudinal como vertical por lo que afectan a masas graníticas del zócalo o basamento. Estas grandes fracturas presentan en superficie buena permeabilidad pero que lógicamente disminuyen con la profundidad. En estas mismas fracturas pero a menos profundidad (P<2.000 m) se encuentran recursos de baja y media temperatura, como se ha puesto de manifiesto en apartados anteriores.
- Galicia. En esta comunidad autónoma se pueden seleccionar dos sistemas regionales de fracturas que podrían presentar condiciones para desarrollar EGS. Por una parte las fracturas que limitan la fosa blastomilonítica que de norte a sur (Coruña a Tuy) recorre el oeste gallego, y que presentan en su trazado abundantes manifestaciones geotérmicas. De otro lado, probablemente de mayor importancia, el sistema de fracturas NS y NE-SW, que recorre las provincias de Lugo y Ourense, pasando por el sur a Portugal. En este sistema de fracturas se encuentra un buen número de manifestaciones termales, yacimientos geotérmicos de baja temperatura y yacimientos de media temperatura. Lugo, Ourense, Ribadavia, Prexiguero, Baños de Molgas, Xunqueira de Ambia y Río Caldo son algunas de las localidades por las que pasa este sistema de fracturas que podrían ser ámbito de desarrollo de proyectos EGS, por reunir condiciones adecuadas. La falta de recubrimiento podría ser una dificultad salvable. El concepto de desarrollo del sistema es muy similar al que se viene desarrollando hoy en día en el Reino Unido (macizo granítico de Cornwall).
- Salamanca-Cáceres. En el sureste de Salamanca se presentan las depresiones o fosas tectónicas de Ciudad Rodrigo y Tormes, en las que, si bien no se presenta la abundante muestra de manifestaciones de otras zonas, se pueden señalar la existencia de condiciones geológicas similares a otras zonas con mayor número de manifestaciones geotérmicas. Estas zonas incluyen la existencia de capas sedimentarias superpuestas. En el oeste de la provincia de Cáceres se localizan zonas fracturadas ligadas a manifestaciones termales (Ceclavin) que podrían tener envergadura suficiente para el desarrollo de EGS.
- Sistema Central–Fosa del Tajo. La fosa de la depresión central del Tajo presenta en sus bordes norte y sur, Sistema Central y Montes de Toledo respectivamente, un conjunto de grandes fracturas distensivas-comprensivas, con amplias zonas de milonitización asociado. La cobertera de materiales mesozoicos y fundamentalmente terciarios es muy potente pudiendo alcanzar en algunos puntos los 4.000 metros. Asimismo, se han medido gradientes geotérmicos de 35-40 ºC/km en sondeos perforados en esta depresión.
- Andalucía. Finalmente, en Andalucía existen áreas que cumpliendo las condiciones o criterios expuestos pueden ser candidatas al desarrollo de posibles EGS. Estas áreas se presentan en dos ámbitos geológicos diferentes. El primero, el Macizo Hercínico, presenta grandes masas de granito con importante fracturación regional, al norte de las provincias de Sevilla y Córdoba. En las proximidades de estas masas graníticas, pero ya en la depresión del Guadalquivir, con rellenos neógenos de más de 1.000 m de espesor, perforaciones de investigación de hidrocarburos han permitido localizar puntos con anomalías geotérmicas (45-50 ºC/km). Estos puntos se encuentran alineados con las grandes fracturas regionales que afectan a las masas graníticas.
  El segundo de los ámbitos geológicos seleccionado, es el área de Sierra Nevada, en la que existe una elevación del zócalo o basamento paleozoico Nevado-Filábride. Este ámbito geológico presenta abundante fracturación regional, especialmente en sus bordes. Tanto al este como al oeste de este ámbito se presentan importantes manifestaciones termales (Lanjarón y Sierra Alhamilla respectivamente) y en los mapas de flujo de calor de la península presentan anomalías importantes alcanzando los 70-90 mW/m^2, equivalentes a gradientes geotérmicos regionales de 40-45 ºC/km.

8 Estimación de los recursos y reservas geotérmicos de España

8.1 INTRODUCCIÓN

Si bien no tiene una relación directa con posibles aprovechamientos futuros se ha realizado una estimación aproximada de la energía geotérmica global existente en el subsuelo de España, en la forma de Recursos de Base Accesible: RBA. El significado de las cifras así estimadas, se pueden considerar como el límite máximo de potencial geotérmico existente en el subsuelo. En otros apartados de este capítulo se concretarán estimaciones de recursos y reservas (calor almacenado) en las áreas seleccionadas a través de los estudios e investigaciones llevadas a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España desde la década de los setenta, adquiriendo ya un sentido más concreto la evaluación, puesto que se aplica a una superficie bajo la cual se tiene ya una evidencia (geológica, geoquímica, geofísica o mediante sondeos) de la existencia de recursos geotérmicos.

Las estimaciones de RBA se van a realizar para varias profundidades, de acuerdo con las metodologías habituales en la Unión Europea, ya expuestas sintéticamente en el Capítulo 6 y en mayor detalle en el Anexo 1.

La profundidad de 3 km para la que se estiman los RBA_3 se establece como el límite actualmente aceptado como económicamente factible a la extracción de recursos geotérmicos.

La profundidad de 7 km establecida para el cálculo de los RBA_7, se establece como el límite actualmente aceptado como técnicamente viable desde el punto de vista de la perforación.

A estas dos profundidades de estimación se ha añadido la de 5 km, que es la establecida por la industria geotérmica como la de existencia de recursos de tipo "Sistemas Geotérmicos Estimulados" –EGS-, que representan un objetivo importante del desarrollo de la industria geotérmica para las próximas décadas.

Para la estimación de los Recursos de Base Accesible (RBA) se ha utilizado la fórmula ya expuesta en el capítulo de metodología:

$$RBA_i\,(Julios) = V_i\,(m^3)\cdot \rho_i\,(\frac{Kg}{m^3})\cdot C_i\,(\frac{Julios}{Kg\cdot {}^oC})\cdot \frac{T_i - T_0}{2}\,({}^oC)$$

En la que

RBA_i = Recurso de base accesible a la profundidad i.

V_i = Volumen del terreno desde la superficie hasta la profundidad i. La superficie de España se ha cuantificado en 504.750 km^2.

ρ_i = Densidad media de la columna rocosa hasta la profundidad i. Para los materiales existentes en el subsuelo español se toma como valor medio ρ_i = 2.600 kg/m^3.

C_i = Capacidad calorífica media de la columna rocosa hasta la profundidad. Se ha tomado C_i = 900 Julios/kg ºC.

T_i = Temperatura a la profundidad i. Para simplificar la estimación se ha tomado un gradiente geotérmico medio para toda España de 30 ºC/km.

T_0 = Temperatura media anual en superficie. A falta de una estimación más concreta se han tomado valores de 13 a 15 ºC. El valor comúnmente citado en la bibliografía climatológica es del rango 13-15 ºC, habiéndose redondeado para cada área la cifra a efectos de sencillez de cálculo.

8.2 RECURSOS DE BASE ACCESIBLE GLOBALES

8.2.1 Recursos de base accesible a 3 km

La temperatura media a esta profundidad se estima en $T_{3km} = T_0$ + 3 km x 30 ºC/km, como T_0 se ha supuesto 13 ºC, T_{3km} se puede estimar en 103 ºC.

Así, los recursos de base accesible hasta 3 km de profundidad se evalúan en:

$$RBA_3 = V_3 \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{T_3 - T_0}{2} = S \cdot 3.000\ m \cdot 2.600\ \frac{kg}{m^3} \cdot 900\ \frac{Julios}{kg \cdot {}^oC} \cdot \frac{90\ {}^oC}{2}$$

Como la superficie asignada es de 504.750 km^2, se estima como recursos RBA_3 la cantidad de: 159,5 x 10^{21} Julios.

8.2.2 Recursos de base accesible a 5 km

En este caso la temperatura se estima en 163 ºC, con lo que los recursos estimados se elevan a

$$RBA_5 = S \cdot 5.000\ m \cdot 2.600\ \frac{kg}{m^3} \cdot 900\ \frac{Julios}{kg \cdot {}^oC} \cdot \frac{150\ {}^oC}{2}$$

es decir, RBA_5 = 442,9 x 10^{21} Julios.

8.2.3 Recursos de base accesible a 7 km

En este caso la temperatura se estima en 223 ºC, con lo que los recursos estimados se elevan a

$$RBA_7 = S \cdot 7.000\ m \cdot 2.600\ \frac{kg}{m^3} \cdot 900\ \frac{Julios}{kg \cdot {}^oC} \cdot \frac{210\ {}^oC}{2}$$

es decir, RBA_7 = 868,1 x 10^{21} Julios.

8.2.4 Resumen de recursos de base accesible en España

Teniendo en consideración la relación existente en Julios y GW.h se presenta a continuación el resumen de los Recursos de Base Accesible en España.

RBA_3 = 159,5 x 10^{21} Julios = 4,43 x 1.010 GW.h

RBA_5 = 442,9 x 10^{21} Julios = 12,31 x 1.010 GW.h

RBA_7 = 868,1 x 10^{21} Julios = 24,1 x 1.010 GW.h

8.3 EVALUACIÓN DE RECURSOS Y CALOR ALMACENADO EN YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

8.3.1 Introducción y metodología

Para cada una de las áreas geotérmicas existentes en España y descritas en el capítulo anterior, se ha llevado a cabo de acuerdo con lo estipulado en el pliego de prescripciones técnicas que rige este trabajo, una evaluación de recursos y calor almacenado en sus diferentes formaciones permeables.

La evaluación de recursos se ha realizado como una estimación de los Recursos de Base Accesible a la profundidad propugnada en este informe –habitualmente 3 km– siguiendo la metodología descrita anteriormente.

Para el cálculo del calor almacenado se ha seguido el método volumétrico que permite fijar con buena precisión los recursos geotérmicos mediante el concepto de elementos finitos. De hecho, casi siempre es posible subdividir la región de estudio en zonas distintas, en función de sus condiciones geológicas. En vertical, la separación debe realizarse en forma de unidades litológicas a las que se atribuya una potencia, porosidad y temperaturas medias.

En zonas donde la información geológica, térmica o de sondeos es insuficiente o inadecuada, siempre se puede estimar la temperatura del almacén mediante geotermometrías químicas. Esta aproximación requiere fijar un techo y una base al almacén y suponer que sus aguas se hallan en equilibrio térmico con la roca del acuífero.

Para cada una de estas unidades o formaciones geológicas permeables se calcula el calor almacenado –*heat in place*, en inglés–.

De acuerdo con la formulación recomendada por la Unión Europea en sus Atlas de Recursos Geotérmicos, este calor almacenado se estima con la siguiente relación:

$$H_0\,(Julios) = [(1-\varnothing)\rho_r\, C_r + \varnothing\, \rho_a\, C_a]\cdot(T_t - T_0)\cdot S\cdot e$$

En la que:

H_0 = Calor almacenado en la formación (Julios).

$\varnothing$ = Porosidad eficaz de la formación (adimensional).

ρ_r = Densidad de la roca almacén (kg/m^3).

C_r = Capacidad calorífica de la formación (Julios/kg ºC).

ρ_a = Densidad del agua de formación. A falta de datos se toma 1.000 kg/m^3.

C_a = Capacidad calorífica del agua de formación: 4.186 Julios/kg ºC.

T_t = Temperatura media del almacén.

T_0 = Temperatura media anual en superficie.

S = Superficie en planta del área considerada del almacén, por lo tanto se refiere a la superficie efectiva de la parte de la formación geológica que puede considerarse almacén.

e = Espesor medio útil del almacén geotérmico. Si no se tienen datos concretos se utiliza el mayor espesor conocido de la formación geológica.

Como ya se ha referido, solo una pequeña fracción del recurso accesible de base puede extraerse a la superficie constituyendo el recurso geotérmico (H_R). Para su evaluación debe conocerse la porosidad eficaz de la formación almacén y fijar el modelo de transporte del fluido a la superficie, sea en forma de agua, vapor o mezcla bifásica, así como el sistema de gestión de los fluidos de rechazo-reinyección o eliminación en superficie.

La cantidad de energía geotérmica extraíble (H_R) a partir de un volumen dado de roca y agua dependerá de una serie de factores geológicos y físicos, tales como del modelo de producción elegido, la temperatura y la presión de producción en cabeza de pozo. Ello implica, pues, la necesidad de disponer de una serie de parámetros que sólo resultan cuantificables cuando existen pozos en producción en la zona y su ingeniería de producción está resuelta, lo que no siempre es posible. En tales circunstancias, muchos autores han optado por utilizar el llamado "**factor de recuperación**".

La extensión del término "factor de recuperación" de la industria minera a la energía geotérmica permite definir el **factor de recuperación geotérmica como la relación entre energía geotérmica extraída y utilizada y la total contenida originalmente en un volumen subterráneo dado de roca y agua**.

El factor de recuperación (R) permite, pues, expresar la energía geotérmica extraíble como un porcentaje de la total contenida en un volumen determinado (V_i)del subsuelo, es decir:

$$H_R = R \times H_i$$

El factor de recuperación R depende, lógicamente, del mecanismo de producción, de la porosidad eficaz de la formación que constituye el volumen V_i y de la diferencia de temperatura entre el almacén y la cabeza de pozo.

En la práctica, en caso de necesidad de reinyección de la salmuera geotérmica (lo más generalizado) su valor es:

$$R = 0{,}33 \cdot \frac{T_t - T_i}{T_t - T_0}$$

Siendo T_t la temperatura de producción, T_i la temperatura de inyección y T_0 la temperatura media anual en superficie. En una primera aproximación y ante la falta de conocimiento del valor T_i, para las estimaciones realizadas en este estudio se aplica R = 0,3 (aún sabiendo que puede llegar a adquirir valores más bajos para T_i elevados).

En caso de no reinyectarse la salmuera fría (casos muy poco probables hoy en día), el valor de R es aproximadamente 0,1. La energía geotérmica extraíble definida anteriormente $H_R = R \times H_i$, se conoce también como *Recurso Identificado* R_I o Reservas.

En los cálculos que se exponen a continuación se ha aplicado a los parámetros físicos valores medios estimados en función del tipo de materiales presentes en el subsuelo y la información disponible en los estudios del IGME ya referenciados.

Así para la estimación de la temperatura se ha tenido en cuenta un gradiente medio general por toda España de 30 ºC/1.000 m y una temperatura media de superficie dependiente de la localización del emplazamiento considerado (12-18 ºC). Para la densidad se ha tenido en cuenta los valores habituales de la misma en función del tipo de materiales de la columna rocosa (2.600-2.700 kg/m^3). Para la capacidad calorífica de la roca se ha tomado de la bibliografía especializada los valores de 825-1.080 Jul/kg ºC. La temperatura de inyección se ha considerado 35 ºC para baja temperatura y 60 ºC para alta temperatura. Finalmente, a la porosidad se la ha asignado un valor acorde con la litología y el grado de fracturación conocido, entre 0,04 y 0,12.

8.3.2 Evaluación de recursos geotérmicos de baja temperatura

Siguiendo el mismo criterio que en el capítulo anterior se ha realizado separadamente el cálculo de los ***recursos de base accesible*** y el ***calor almacenado***, para las grandes cuencas sedimentarias y para zonas de cordilleras y depresiones internas de las mismas (otras zonas).

Grandes cuencas sedimentarias

En la tabla 8.1 se presentan los datos de cálculo de recurso de base accesible (RBA) y calor almacenado (H_0) para las diferentes cuencas, para las diferentes formaciones permeables y para las zonas de posible explotación, descritas todas ellas en el capítulo anterior.

Los RBA_3 en las 5 grandes cuencas sedimentarias de España, que por su superficie total de 278.000 km^2 representa el 55% de toda la superficie española, se elevan a 89.508 exajulios, lo que representa el 56% de los RBA_3 de toda España descrito en el apartado anterior.

Tabla 8.1. Evaluación de recursos de baja temperatura (grandes cuencas sedimentarias)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
Cuenca del Duero																
D	Duero global	70.000	3.000	102	2.650	900	12						22.538	-	-	-
D	Cretácico	27.500			2.650	825	12	65	200	35	0,07	0,3	-	678	203	565
D	Jurásico	7.000			2.600	900	12	75	80	35	0,04	0,3	-	85	26	71
D	Triásico Detrítico	10.500			2.650	825	12	85	60	35	0,06	0,3	-	106	32	88
													-	869	261	724
Zonas de posible explotación																
D	Palencia	10			2.650	825	12	75	250	35	0,07	0,3	-	0,4	0,1	0,3
D	Valladolid	25			2.650	825	12	65	60	35	0,07	0,3	-	0,2	0,1	0,2

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
D	Burgos	20			2.650	900	12	85	1.200	35	0,05	0,3	-	4,3	1,3	3,6
D	León	12			2.650	900	12	55	100	35	0,05	0,3	-	0,1	0,04	0,1
D	Soria	5			2.650	900	12	70	800	35	0,07	0,3	-	0,6	0,2	0,5
													-	5,6	1,7	4,7
Cuenca del Ebro																
E	Ebro Global	75.000	3.000	104	2.650	900	14						24.148	-	-	-
E	Cretácico-Eoceno	12.000			2.600	860	14	60	200	35	0,04	0,3	-	255	77	213
E	Jurásico	15.000			2.650	950	14	70	300	35	0,04	0,3	-	651	195	543
E	Triásico Carbonat.	30.000			2.650	950	14	80	250	35	0,04	0,3	-	1.279	384	1.066
E	Triásico Detrítico	40.000			2.650	825	14	85	100	35	0,1	0,3	-	678	203	565
													-	2.863,6	859,1	2.386,3
Zona de posible explotación																
E	Huesca	5			2.650	900	13	90	280	35	0,08	0,3	-	0,3	0,1	0,2
E	Lérida	10			2.650	950	14	65	200	35	0,06	0,3	-	0,3	0,1	0,2
E	Zaragoza	30			2.650	900	14	80	100	35	0,07	0,3	-	0,5	0,1	0,4
													-	1,0	0,3	0,9
Cuenca de Tajo-Mancha-Júcar																
TJM	T-M-J Global	80.000	3.000	105	2.650	900	15						25.758	-	-	-
TJM	Mioceno Detrítico	2.500			2.650	825	15	75	250	35	0,12	0,3	-	91	27	76
TJM	Cretácico	50.000			2.650	850	16	80	200	35	0,07	0,3	-	1.528	458	1.274
TJM	Jurásico	45.000			2.600	950	16	85	600	35	0,04	0,3	-	4.729	1.419	3.941
TJM	Triásico Carbonat.	45.000			2.600	950	16	90	100	35	0,04	0,3	-	845	254	704

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
TJM	Triásico Detrítico	45.000			2.650	825	17	95	200	35	0,1	0,3	-	1.675	503	1.396
													-	8.869	2.661	7.391
Zona de posible explotación																
TMJ	Madrid	300			2.650	825	15	75	250	35	0,12	0,3	-	10,9	3,3	9,1
TMJ	Albacete	20			2.650	900	15	85	900	35	0,04	0,3	-	3,1	0,9	2,6
TMJ	Cuenca	10			2.650	850	15	80	1.100	35	0,04	0,3	-	1,7	0,5	1,4
TMJ	Valencia	200			2.650	900	18	80	1.500	35	0,07	0,3	-	46,7	14,0	38,9
													-	62,4	18,7	52,0
Cuenca del Guadalquivir																
G	Guadalq. Global	25.000	3.000	108	2.650	900	18						8.049	-	-	-
G	Mioceno basal	15.000			2.650	825	18	50	50	35	0,1	0,3	-	57,3	17,2	47,7
G	Jurásico Meseta	7.000			2.600	950	18	90	200	35	0,04	0,3	-	256	77	213
													-	313	94	261
Zona de posible explotación																
G	Jaén	20			2.650	850	18	70	250	35	0,06	0,3	-	0,6	0,2	0,5
												-	-	0,6	0,2	0,5
Cuenca Norte-Cantábrica																
C	Cantabria Global	28.000	3.000	103	2.650	900	13						9.015	-	-	-
C	Cretácico	8.500			2.650	825	13	70	3.500	35	0,06	0,3	-	3.911	1.173	3.259
C	Jurásico	13.000			2.650	900	13	80	300	35	0,04	0,3	-	642	193	535
C	Triásico Detrítico	13.000			2.650	825	13	90	300	35	0,05	0,3	-	687	206	572
													-	5.239	1.572	4.366

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
Zona de posible explotación																
C	Vitoria	40			2.650	825	13	70	3.500	35	0,06	0,3	-	18,4	5,5	15,3
C	Bilbao	200			2.650	825	13	70	3.500	35	0,06	0,3	-	92,0	27,6	76,7
													-	110,4	33,1	92,0

P = Profundidad de almacén
T_p = Temperatura a la profundidad considerada
P_i = Densidad media de las rocas hasta la profundidad considerada
C_i = Capacidad calorífica de la roca hasta la profundidad considerada
T_0 = Temperatura anual media en superficie
T_A = Temperatura en techo del almacén geotérmico
T_i = Temperatura de inyección
h = Espesor útil del almacén geotérmico
ø = Porosidad media del almacén geotérmico
R = Factor de recuperación
RBA_p = Recursos de base accesible a la profundidad considerada
H_0 = Calor almacenado en la formación almacén
H_R = Calor recuperable = H_0R

El calor almacenado total, H_0, de las principales formaciones permeables –Cretácico, Jurásico, Triásico Carbonatado, Triásico Detrítico y en bastante menor medida el Mioceno Detrítico–, se eleva a 18.153 exajulios, es decir el 20% de los recursos de base accesible. De estos 18.153 exajulios, el 30% se considera calor teóricamente recuperable, es decir 5.446 exajulios, lo que equivale a 15.126 x 10^5 GW.h térmicos teóricamente recuperables. El cálculo para las zonas de posible explotación, por existencia de consumidores, seleccionadas a través de estudios de previabilidad, muestra que el calor teóricamente recuperable se reduce a 150,3 x 10^5 GW.h, es decir, el 1% del total teórico.

Otras zonas

En la tabla 8.2 se presenta la evaluación de recursos geotérmicos de baja temperatura de las áreas incluidas en este apartado, es decir, Cordillera Costero-Catalana, Cordilleras Béticas, Galicia y Salamanca-Extremadura. Los RBA_3 de estas zonas se elevan a 12.988 exajulios, lo que representa el 8,1% de los RBA_3 de toda España. El calor almacenado en las zonas estudiadas, H_0, se eleva a 883 exajulios, lo que representa el 6,8% de los RBA_3 definidos en las zonas. De este calor almacenado el 30%, es decir, 265 exajulios pueden considerarse teóricamente recuperables, lo que equivale a unos 736 x 10^5 GW.h térmicos. En zonas de posible explotación el calor teóricamente recuperable se eleva a 9,6 x 10^5 GW.h térmicos, lo que representa el 1,3% del total teórico.

Total

En resumen, en las áreas geotérmicas seleccionadas y puestas en evidencia por los estudios llevados a cabo principalmente por el IGME y en menor proporción por otras entidades, para recursos geotérmicos de baja temperatura se estima un calor almacenado total de unos 19.000 exajulios, de los que el máximo teórico extraíble es de 5.710 exajulios, equivalentes a 15.862 x 10^5 GW.h térmicos. De esta energía teóricamente extraíble, sólo una parte podría actualmente tener aprovechamiento, al encontrarse en las denominadas zonas de posible explotación. Esta cantidad se ha estimado en 159,9 x 10^5 GW.h, es decir, aproximadamente el 1% del teórico total extraíble.

8.3.3 Evaluación de recursos geotérmicos de media temperatura

Como ya se ha mencionado en el capítulo 7, existen dos tipos de áreas con recursos de media temperatura, consideradas en este informe. Por una parte zonas concretas, estudiadas por el IGME o puestas en evidencia por sondeos de prospección de hidrocarburos, en las que la existencia del recurso puede darse con alta probabilidad y precisión en su delimitación, que se han catalogado como zonas reconocidas o estudiadas. Por otra parte existen áreas más extensas, deducidas por interpretación de la documentación geológica sobre formaciones profundas o de la investigación de hidrocarburos –principalmente prospección sísmica y ocasionalmente sondeos exploratorios–, en las que es posible la existencia de recursos de media –e incluso alta– temperatura, pero cuya confirmación requiere de una investigación más detallada no realizada todavía, que se han catalogado como yacimientos o recursos potenciales de media temperatura. Ambos tipos de áreas o zonas han sido sometidos al procedimiento de evaluación de recursos y calor almacenado. En la tabla 8.3 se presentan los cálculos para las áreas reconocidas o estudiadas.

Tabla 8.2. Evaluación de recursos de baja temperatura (otras zonas)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
Costero-Catalanas																
CC	Vallés	600	3.000	120	2.700	1.080	15						276	-	-	-
CC	Vallés (Fallas)	45			2.700	1.080	15	80	1.000	35	0,1	0,3	-	8,9	2,7	7,4
CC	Penedés	550	3.000	107	2.600	950	15	50	150	35	0,1	0,3	187	7,6	2,3	6,4
CC	Reus-Valls	400	3.000	107	2.600	900	15						129	-	-	-
CC	Reus-Montbrió	15			2.650	850	15	80	200	35	0,1	0,3	-	0,5	0,1	0,4
CC	Selva	250	3.000	107	2.700	1.080	15						101	-	-	-
CC	Selva (Fallas)	25			2.700	1.080	15	55	1.000	35	0,1	0,3	-	3,0	0,9	2,5
CC	Ampurdán	500	3.000	107	2.600	900	15						161	-	-	-
CC	Ampudán (Eoceno)	400			2.600	850	15	55	60	35	0,1	0,3	-	2,3	0,7	1,9
CC	Olot	250	3.000	107	2.600	900	15						81	-	-	-
CC	Olot (Eoceno)	250			2.600	850	15	80	275	35	0,1	0,3	-	10,8	3,2	9,0
													935	33	10	28

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
Zonas de posible explotación																
CC	Vallés-Terrasa	22			2.700	1.080	15	80	1.000	35	0,1	0,3	-	4,4	1,3	3,6
CC	Vallés-Granollers	13			2.700	1.080	15	80	1.000	35	0,1	0,3	-	2,6	0,8	2,1
CC	Penedés-Vilafranca	4			2.600	950	15	50	150	35	0,1	0,3	-	0,1	0,02	0,0
CC	Reus-Reus	10			2.600	900	15	65	80	35	0,1	0,3	-	0,1	0,03	0,1
CC	Reus-Montbrió	3			2.650	850	15	80	200	35	0,1	0,3	-	0,1	0,03	0,1
													-	7,2	2,2	6,0
Cordilleras Béticas																
CB	Subbética	5.400	3.000	108	2.600	900	18						1.706	-	-	-
CB	Depres. internas	4.500	3.000	108	2.600	900	18						1.422	-	-	-
CB	Depresión Granada	1.200			2.600	900	18	85	550	35	0,06	0,3	-	108	33	90
CB	Depresión Guadix-Baza	2.000			2.600	900	18	80	500	35	0,06	0,3	-	152	46	127
CB	Depresión Campo Dalías	110			2.600	900	18	55	600	35	0,06	0,3	-	6,0	1,8	5,0
CB	Depresión Sorbas-Níjar	300			2.600	900	18	50	150	35	0,08	0,3	-	3,6	1,1	3,0
CB	Depresión Andarax	100			2.600	900	18	65	100	35	0,06	0,3	-	1,2	0,3	1,0
CB	Bajo Almanzora	120			2.600	900	18	70	500	35	0,06	0,3	-	7,6	2,3	6,4
CB	Prebético de Murcia	3.800	3.000	108	2.600	900	16	75	500	35	0,06	0,3	1.277	274,7	82,4	228,9
CB	Subbético de Zonas Internas Murcia	5.000	3.000	108	2.600	900	18	65	500	35	0,06	0,3	1.580	288,0	86,4	240,0
CB	Lluchmajor (Mallorca)	150			2.600	865	18	65	300	35	0,06	0,3	-	5,0	1,5	4,2
													5.934	846	254	705

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_O (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_O (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
Zonas de posible explotación																
CB	Granada	7			2.600	900	18	85	550	35	0,06	0,3	-	0,6	0,2	0,5
CB	Guadix	3			2.600	900	18	80	500	35	0,06	0,3	-	0,2	0,1	0,2
CB	Campo Dalias	60			2.600	900	18	55	600	35	0,06	0,3	-	3,3	1,0	2,7
													-	4,1	1,2	3,4
Galicia																
GA	Galicia	29.400	3.000	103	2.600	971	13						10.020	-	-	-
GA	Ourense (Área)	100	3.000	103	2.600	971	13						34	-	-	-
GA	Ourense (Falla)	12			2.600	971	13	70	1.000	35	0,1	0,3	-	1,8	0,6	1,5
GA	Molgas (Falla)	3			2.600	971	13	50	1.000	35	0,1	0,3	-	0,3	0,1	0,2
GA	Río Caldo (Falla)	2			2.600	971	13	75	1.000	35	0,1	0,3	-	0,3	0,1	0,3
GA	Rivadavia-Prexigueiro	2			2.600	971	13	60	1.000	35	0,1	0,3	-	0,3	0,1	0,2
GA	Caldes-Cuntis	10			2.600	971	13	50	1.000	35	0,1	0,3	-	1,0	0,3	0,8
GA	Tuy (Falla)	4			2.600	971	13	60	1.000	35	0,1	0,3	-	0,5	0,2	0,4
GA	Arteixo-Loureda	1			2.600	971	13	60	1.000	35	0,1	0,3	-	0,1	0,04	0,1
GA	Lugo (Área)	30	3.000	103	2.600	971	13						10	-	-	-
GA	Lugo (Falla)	3			2.600	971	13	55	1.000	35	0,1	0,3	-	0,3	0,1	0,3
													10.020	4,7	1,4	3,9
Zona de posible explotación																
GA	Ourense	2			2.600	971	13	70	1.000	35	0,1	0,3	-	0,3	0,1	0,3
GA	Río Caldo	0,5			2.600	971	13	75	1.000	35	0,1	0,3	-	0,1	0,03	0,1
GA	Lugo	1			2.600	971	13	55	1.000	35	0,1	0,3	-	0,1	0,03	0,1
													-	0,5	0,2	0,4

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)
Salamanca-Extremadura																
SA-EX	Ciudad Rodrigo (Falla)	35			2.600	971	13	60	1.000	35	0,05	0,3	-	4,3	1,3	3,6
SA-EX	Ceclavin (Falla)	4			2.600	971	15	50	1.000	35	0,05	0,3	-	0,4	0,1	0,3
													-	4,7	1,4	3,9

P = Profundidad de almacén
T_p = Temperatura a la profundidad considerada
P_i = Densidad media de las rocas hasta la profundidad considerada
C_i = Capacidad calorífica de la roca hasta la profundidad considerada
T_0 = Temperatura anual media en superficie
T_A = Temperatura en techo del almacén geotérmico
T_i = Temperatura de inyección
h = Espesor útil del almacén geotérmico
ø = Porosidad media del almacén geotérmico
R = Factor de recuperación
RBA_p = Recursos de base accesible a la profundidad considerada
H_0 = Calor almacenado en la formación almacén
H_R = Calor recuperable = H_0R

Del calor almacenado estimado, el 30%, es decir, 19,52 exajulios se considera calor almacenado teóricamente recuperable, es decir, reservas geotérmicas. Este calor equivale a 54,23 x 10^5 GW.h térmicos.

Esta energía se ha traducido en potencia eléctrica instalable (capacidad) mediante una estimación aproximada, que tiene en cuenta el rendimiento de los ciclos binarios para producir electricidad (se ha tomado el 10% como valor medio), la renovabilidad del recurso (se ha supuesto el 2,5%) y una ocupación de 8.000 horas, equivalentes a una carga de 91,3%. Con estas premisas la capacidad eléctrica instalable propuesta en recursos geotérmicos de media entalpia se eleva a 1.695 MW(e).

En la tabla 8.4 se presentan los cálculos para los recursos potenciales en áreas seleccionadas por geología profunda.

El calor almacenado H_0, en las 7 áreas seleccionadas se eleva a 650 exajulios, lo que representa 10 veces el estimado en las áreas reconocidas. El 70% de esta cantidad se concentra en las áreas del Prepirineo y Cuenca Cantábrica. La fracción recuperable de este calor almacenado se eleva a 195 exajulios equivalentes a 541 x 10^5 GW.h térmicos.

Esta energía recuperable puede traducirse en una capacidad eléctrica instalable bruta y potencial de cerca de 17.000 MW(e). Lógicamente, solo una fracción de este potencial se podría pasar a potencia neta instalable tras los estudios e investigaciones de detalle correspondientes.

8.3.4 Evaluación de recursos geotérmicos de alta temperatura

En la tabla 8.5 se presentan los cálculos para evaluación de recursos de alta temperatura, en su sentido convencional, que como se detalla en el capítulo anterior corresponden a yacimientos del tipo magmáticos, sólo existentes en las Islas Canarias.

Los cálculos efectuados para los casos de Lanzarote y La Palma, se hacen sólo a título orientativo, ya que no se dispone de información respecto a las posibles instalaciones de aprovechamiento.

Tabla 8.3. Evaluación de recursos de Media Temperatura en zonas reconocidas o estudiadas

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_P (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_O (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_O (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Gran Canaria	SE (Aguimes-Ingenio-Bco. Juan Grande)	150	2.000	130	2.700	900	20	130	100	0,05	0,3	40,10	4,15	1,25	3,46	108
Pirineo-Ebro	Jaca-Serrablo	200	4.000	160	2.600	900	13	160	200	0,08	0,3	137,59	14,63	4,39	12,19	381
Sevilla-Cádiz	Lebrija (Bética 14-1)	300	3.500	140	2.600	900	18	140	100	0,08	0,3	149,88	9,10	2,73	7,59	237
Granada	Lanjarón-Depresión de Granada	140	3.000	130	2.600	900	15	130	200	0,05	0,3	56,51	7,83	2,35	6,53	204
Almería	Sierra Alhamilla	200	3.000	130	2.600	900	18	130	100	0,05	0,3	78,62	5,45	1,63	4,54	142
Orense	Orense-Río Miño	10	2.000	130	2.700	900	13	130	200	0,05	0,3	2,84	0,59	0,18	0,49	15
	Río Caldo	1	2.000	130	2.700	900	13	130	200	0,05	0,3	0,14	0,03	0,01	0,02	0,8
	Prexigueiro	1	2.000	130	2.700	900	13	130	200	0,05	0,3	0,14	0,03	0,01	0,02	0,8
	Xunqueira de Ambia-Molgas	3	2.000	130	2.700	900	13	130	200	0,05	0,3	0,85	0,18	0,05	0,15	4,6
Lugo	Balneario de Lugo	1	2.000	120	2.700	900	13	120	200	0,05	0,3	0,13	0,03	0,01	0,02	0,7
Pontevedra	Alineación NS (Caldas-Caldelas de Tuv)	8	2.000	120	2.700	900	13	120	200	0,05	0,3	1,95	0,40	0,12	0,34	10,5
Coruña	Arteixo-Loureda	2	2.000	120	2.700	900	13	120	200	0,05	0,3	0,39	0,08	0,02	0,07	2,1
Salamanca-Extremadura	Ciudad Rodrigo	25	2.000	120	2.700	900	13	120	200	0,05	0,3	6,50	1,35	0,40	1,12	35,1
	Ceclavin	2	2.000	110	2.700	900	15	110	200	0,05	0,3	0,46	0,10	0,03	0,08	2,5
Madrid	Cretácico de Madrid	240	3.500	140	2.600	900	15	140	200	0,05	0,3	122,85	14,59	4,38	12,16	380

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_P (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Cataluña	La Selva	25	2.500	130	2.700	900	15	130	200	0,08	0,3	8,73	1,48	0,44	1,23	38
	Vallés	50	2.500	130	2.700	900	15	130	200	0,08	0,3	17,47	2,96	0,89	2,46	77
	Prineo Axial	35	2.500	130	2.700	900	13	130	200	0,08	0,3	12,44	2,11	0,63	1,75	55
												637,60	**65,08**	**19,52**	**54,23**	**1.695**

P = Profundidad de almacén
T_p = Temperatura a la profundidad considerada
P_i = Densidad media de las rocas hasta la profundidad considerada
C_i = Capacidad calorífica de la roca hasta la profundidad considerada
T_0 = Temperatura anual media en superficie
T_A = Temperatura en techo del almacén geotérmico
h = Espesor útil del almacén geotérmico
ø = Porosidad media del almacén geotérmico
R = Factor de recuperación
RBA_p = Recursos de base accesible a la profundidad considerada
H_0 = Calor almacenado en la formación almacén
H_R = Calor recuperable = H_0R
W_i = Capacidad instalable propuesta (estimación aproximada)

Tabla 8.4. Evaluación de recursos y calor almacenado bruto en yacimientos potenciales de Media Temperatura (áreas seleccionadas por geología de subsuelo profunda)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_P (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Prepirineo	Huesca-Zaragoza-Navarra	9.000	4.000	140	2.600	900	13	130	100	0,05	0,3	5.349,24	256,12	76,84	213,43	6.670
Cantábrica	Sinclinorio Vizcaíno	1.760	4.000	140	2.600	900	14	130	150	0,05	0,3	1.037,84	74,49	22,35	62,07	1.940
	Sinclinorio Treviño-Urbasa	500	4.000	140	2.600	900	13	130	100	0,05	0,3	297,18	14,23	4,27	11,86	371
	Sinclinorio Villarcayo-Miranda-Treviño	2.650	4.000	140	2.600	900	13	130	150	0,05	0,3	1575,05	113,12	33,94	94,27	2.946
Tajo	Norte de Madrid-Guadalajara	1.900	3.500	140	2.600	900	14	130	100	0,05	0,3	980,34	53,61	16,08	44,67	1.396
Guadalquivir	Límite Subbético Cádiz-Sevilla	1.500	3.500	150	2.600	900	18	150	100	0,05	0,3	810,81	48,16	14,45	40,13	1.254

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	P (m)	T_p (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	Ø	R (%)	RBA_p (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Murcia	Subbético y zonas Internas	1.800	4.000	150	2.700	900	18	150	150	0,05	0,3	1.154,74	89,73	26,92	74,78	2.337
												11.205,20	649,46	194,84	541,22	16.913

P = Profundidad de almacén
T_p = Temperatura a la profundidad considerada
P_i = Densidad media de las rocas hasta la profundidad considerada
C_i = Capacidad calorífica de la roca hasta la profundidad considerada
T_0 = Temperatura anual media en superficie
T_A = Temperatura en techo del almacén geotérmico
h = Espesor útil del almacén geotérmico
ø = Porosidad media del almacén geotérmico
R = Factor de recuperación
RBA_p = Recursos de base accesible a la profundidad considerada
H_0 = Calor almacenado en la formación almacén
H_R = Calor recuperable = H_0R
W_i = Capacidad instalable propuesta (estimación aproximada)

Tabla 8.5. Evaluación de recursos de alta temperatura

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	T_3 km (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	T_i (ºC)	Ø	R (%)	RBA_3 (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Tenerife	Dorsal	30	200	2.700	900	20	200	100	60	0,05	0,3	19,70	1,06	0,32	0,88	110
	Oeste	16	180	2.700	900	20	180	100	60	0,05	0,3	8,40	0,48	0,15	0,41	51
	Sur	20	180	2.700	900	20	180	100	60	0,05	0,3	10,50	0,60	0,2	0,52	65
Lanzarote	Hilario y Camellos	0,005	600 (1km)	2.700	900	20	300	500	60	0,05	0,3	0,003	0,0015	0,0005	0,0014	0,17
La Palma	Teneguía	0,055	300 (1km)	2.700	900	20	200	500	60	0,05	0,3	0,019	0,01	0,003	0,008	1,01
												38,622	2,15	0,670	1,820	227,18

$T_{3\,km}$ = Temperatura a 3 km de profundidad
P_i = Densidad media de las rocas hasta la profundidad considerada
C_i = Capacidad calorífica de la roca hasta la profundidad considerada
T_0 = Temperatura anual media en superficie
T_A = Temperatura en techo del almacén geotérmico
h = Espesor útil del almacén geotérmico
ø = Porosidad media del almacén geotérmico
R = Factor de recuperación
RBA_3 = Recursos de base accesible hasta 3 km de profundidad
H_0 = Calor almacenado en la formación almacén
H_R = Calor recuperable = H_0R
W_i = Capacidad instalable propuesta (estimación aproximada)

En cuanto a Tenerife, se han realizado los cálculos para las tres zonas descritas. Considerando la información geoquímica y geotermométrica, se ha supuesto una temperatura de recurso de 200 ºC en el área de la Dorsal Este, y de 180 ºC para las áreas NW y S.

De acuerdo con estos cálculos se ha estimado para Tenerife un calor almacenado total de 2,15 exajulios, que se traducen en 0,65 exajulios de energía recuperable, equivalentes a 1,82 x 10^5 GW.h térmicos. Aplicando una hipótesis de rendimiento de proceso del 13,5%, renovabilidad del 7,5% y ocupación de 8.000 horas, el total de potencia instalable se eleva a unos 227 MW(e).

8.3.5 Evaluación de recursos en posibles Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS)

En la tabla 8.6 se presentan los cálculos para evaluación de recursos geotérmicos ligados a posibles Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS). En estos cálculos se incluyen todas las áreas propuestas en el capítulo anterior como posibles emplazamientos para el desarrollo de sistemas estimulados.

Los valores utilizados de los diferentes parámetros se han tomado de la información disponible o se han estimado en base al conocimiento de la zona. Al tratarse de recursos potencialmente existentes en zonas poco conocidas por su profundidad y estructura geológica, la precisión y representatividad de los datos es menor que en otros tipos de recurso.

El calor almacenado en estos emplazamientos se ha estimado en 71,5 exajulios, de los que serían teóricamente extraíbles del orden de 21,5 exajulios, equivalentes a 60 x 10^5 GW.h. Considerando rendimientos del ciclo binario correspondiente del 10%, renovabilidad de recursos del 1% y utilización durante 8.000 horas/año, se ha deducido una potencia total instalable de 745 MW(e).

8.4 POTENCIAL GEOTÉRMICO EN ESPAÑA

Como resumen de lo expuesto en apartados y tablas anteriores, el potencial geotérmico de España se puede concretar en las siguientes cifras.

Recursos de base accesible

Recursos de base accesible hasta 3 km de profundidad **RBA_3 = 4,41 x 10^{10} GW.h**

Recursos de base accesible hasta 5 km de profundidad **RBA_5 = 12,3 x 10^{10} GW.h**

Recursos de base accesible hasta 7 km de profundidad **RBA_7 = 24,1 x 10^{10} GW.h**

Tabla 8.6. Evaluación de recursos en posibles Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	$T_{5\,km}$ (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	Ø	R (%)	RBA_5 (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Galicia	Lugo-Orense-Molgas-Río Caldo	60	180	2.700	900	13	180	500	0,08	0,3	60,87	12,88	3,86	10,73	134
	Coruña-Pontevedra	50	180	2.700	900	13	180	500	0,05	0,3	50,73	10,51	3,15	8,76	109
Sistema Central	Madrid	50	200	2.700	900	13	200	500	0,05	0,3	56,80	11,77	3,53	9,81	123
	Toledo	10	200	2.700	900	13	200	500	0,05	0,3	11,36	2,35	0,71	1,96	25

(Continuación)

Áreas	Zonas	Superficie (km^2)	$T_{5\,km}$ (ºC)	P_i (kg/m^3)	C_i (Julios/ kg.ºC)	T_0 (ºC)	T_A (ºC)	h (m)	Ø	R (%)	RBA_5 (10^{18} Julios)	H_0 (10^{18} Julios)	H_R (10^{18} Julios)	H_R (10^5 GW.h)	W_i MW(e)
Salamanca-Extremadura	Fosa Ciudad Rodrigo	15	180	2.700	900	13	180	500	0,05	0,3	15,22	3,15	0,95	2,63	33
	Fosa Tormes	7,5	180	2.700	900	13	180	500	0,05	0,3	7,61	1,58	0,47	1,31	16
	Ceclavin	2	180	2.700	900	15	180	500	0,05	0,3	2,00	0,42	0,12	0,35	4
Andalucía	Sierra Morena-Valle del Guadalquivir	50	200	2.700	900	15	200	500	0,05	0,3	56,19	11,64	3,49	9,70	121
	Sierra Nevada-Nevados Filábrides	25	180	2.700	900	15	180	500	0,08	0,3	25,06	5,30	1,59	4,42	55
Cataluña	Fosa Selva	20	200	2.700	900	15	200	500	0,08	0,3	22,48	4,76	1,43	3,96	50
	Fosa Vallés	30	200	2.700	900	15	200	500	0,08	0,3	33,72	7,13	2,14	5,94	74
											342,04	**71,50**	**21,45**	**59,58**	**745**

$T_{5\,km}$ = Temperatura a 5 km de profundidad
P_i = Densidad media de las rocas hasta la profundidad considerada
C_i = Capacidad calorífica de la roca hasta la profundidad considerada
T_0 = Temperatura anual media en superficie
T_A = Temperatura en techo del almacén geotérmico
h = Espesor útil del almacén geotérmico
ø = Porosidad media del almacén geotérmico
R = Factor de recuperación
RBA_5 = Recursos de base accesible hasta 5 km de profundidad
H_0 = Calor almacenado en la formación almacén
HR = Calor recuperable = HOR
W_i = Capacidad instalable propuesta (estimación aproximada)

Calor almacenado recuperable y explotable

1. Recursos geotérmicos de baja temperatura (profundo)

- H_R grandes cuencas sedimentarias **15.126 x 10^5 GW.h**
- H_{Re} (recuperable) grandes cuencas sedimentarias en zonas con potenciales consumidores **150,3 x 10^5 GW.h**
- H_R otras zonas (Cordilleras Periféricas y Macizo Hercínico) **736 x 10^5 GW.h**
- H_{Re} (recuperable) otras zonas (en áreas con consumidores) **9,6 x 10^5 GW.h**

TOTAL H_R de baja temperatura **15.862 x 10^5 GW.h**

TOTAL H_{Re} (recuperable) de baja temperatura en áreas con consumidores **159,9 x 10^5 GW.h**

Suponiendo un rendimiento de transformación en energía útil del 90%, renovabilidad del recurso del 1% y utilización media de 2.500 horas/año, esta energía equivaldría a una potencia instalada de **57.563 MW(t).**

2. Recursos geotérmicos de media temperatura

- Áreas reconocidas y/o estimadas en estudios del IGME:

$$H_R = 54{,}23 \times 10^5 \text{ GW.h}$$

Suponiendo un rendimiento medio de generación del 10%, renovabilidad del 2,5% y 8.000 horas de utilización, se puede llegar a instalar **1.695 MW(e).**

- Áreas potenciales, no reconocidas pero sí deducidas de informes geológicos sobre formaciones profundas:

$$H_R = 541 \times 10^5 \text{ GW.h}$$

Equivalentes a una capacidad bruta potencial de **17.000 MW(e).**

3. Recursos geotérmicos de alta temperatura (convencionales)

Limitado a posibles yacimientos en Tenerife:

$$H_R = 1{,}82 \times 10^5 \text{ GW.h}$$

Suponiendo un rendimiento medio de generación del 13,5%, renovabilidad del 7,5% y 8.000 horas de utilización, se puede llegar a instalar **227 MW(e).**

4. Recursos geotérmicos en EGS

Limitado a las 5 grandes áreas propuestas,

$$H_R = 60 \times 10^5 \text{ GW.h}$$

Suponiendo un rendimiento medio de generación del 10%, renovabilidad del 1% y 5.000 horas de utilización, se puede llegar a instalar **745 MW(e).**

8.5 PROPUESTA DE DESARROLLO DE APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

Considerando el potencial de recursos existente en España, descrito detalladamente en el capítulo 7 y evaluado cuantitativamente en apartados anteriores de este capítulo, se ha elaborado una propuesta para desarrollo de dicho potencial en todas sus variantes de tipo de energía geotérmica, desde la de muy baja temperatura o somera, hasta la de sistemas geotérmicos estimulados EGS.

Esta propuesta se hace desde el conocimiento adquirido del potencial existente, del mercado de consumidores y de los estudios y análisis de viabilidad de explotación realizados en el pasado.

8.5.1 Propuesta de desarrollo de aprovechamientos de energía geotérmica somera de muy baja temperatura

La encuesta realizada en este proyecto para la realización de un inventario de explotaciones geotérmicas de baja y muy baja temperatura, permitió cuantificar un total de 36 MW(t) instalados, habiendo contestado solamente el 38% de las empresas encuestadas.

Por otra parte, en los datos manejados por la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (GEOPLAT) se incluyen cifras de 70-100 MW(t) instalados, mientras que en la comunicación presentada al reciente Congreso Mundial de Geotermia, WGC2010 en Bali, "*The evolution of geotermal energy in Spain Country Update* (2005-2009)" de José Sánchez Guzmán y Celestino García de la Noceda, se estimó en 120 MW(t) la potencia total instalada.

Con esta información, se han supuesto dos situaciones diferentes de partida para 2010: 70 y 100 MWt instalada. Con estos dos puntos de partida se ha preparado la tabla 8.7, de evolución de potencia instalada en los próximos 10 años, contemplando 3 escenarios diferentes de evolución a los que se han denominado conservador, realista y optimista. En el primero se supone un crecimiento del 20% anual durante 2 años, seguido de 3 años al 15% y los últimos 5 años al 10%. En el caso denominado realista se ha supuesto un crecimiento de 30% de los primeros años, el 20% los tres siguientes y el 15% los cinco últimos. Finalmente, el tercer escenario supone un crecimiento continuo del 30% durante los diez años.

De acuerdo con los datos obtenidos, la potencia total instalada en 2020 podría variar desde 247 MWt instalados –escenario más conservador para 70 MWt de partida–, hasta los 1.379 MWt instalados –escenario más optimista para 100 MWt de partida. En el escenario denominado realista la potencia instalada sería de 411 MWt para 70 MWt de partida y 587 MWt para 100 MWt de partida.

Tabla 8.7. Propuesta de desarrollo de proyectos geotérmicos de muy baja temperatura (bomba de calor)

Escenarios propuestos	Capacidad instalada bomba de calor geotérmica (MWt)										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Conservador[1]	70	84	101	116	133	153	169	185	204	224	247
	100	120	144	166	190	219	241	265	291	321	353
Realista[2]	70	91	118	142	170	204	235	270	311	358	411
	100	130	169	203	243	292	336	386	444	511	587
Optimista[3]	70	91	118	154	200	260	338	439	571	742	965
	100	130	169	220	286	371	483	627	816	1.060	1.379

[1]Crecimientos: 20% 2011-12; 15% 2013-2015; 10% 2016-20
[2]Crecimientos: 30% 2011-12; 20% 2013-2015; 15% 2016-20
[3]Crecimientos: 30% 2011-20

8.5.2 Propuesta de desarrollo de aprovechamientos de recursos geotérmicos de baja temperatura (geotermia profunda)

Partiendo de la información de estudios de viabilidad técnico-económica realizados en las décadas de los 70, 80 y 90, por el Instituto Geológico y Minero de España y otras entidades, se ha elaborado la tabla 8.8 de posibles proyectos a desarrollar en los próximos 10 años. El grado de investigación alcanzado permite considerarlos proyectos maduros, desde el punto de vista de los recursos, cuyo desarrollo depende exclusivamente de condiciones de mercado.

Si las condiciones de mercado son las adecuadas, un total de 45 operaciones se podrían desarrollar, con una potencia instalada de 277 MWt, suponiendo, para 3.500 horas/año de utilización media, un aprovechamiento de casi 980 GW.h/año, es decir, 84.280 tep/año.

8.5.3 Propuesta de desarrollo de aprovechamientos de recursos geotérmicos de media y alta temperatura y sistemas geotérmicos estimulados (EGS) para la producción de electricidad

Considerando el estado actual de conocimiento de los recursos en estos tres grupos de tipo de energía geotérmica y el grado de interés apreciado en las empresas interesadas en este tipo de proyectos, a través de los permisos solicitados y las investigaciones realizadas hasta la fecha, se ha elaborado una propuesta de desarrollo de proyectos en un escenario conservador que incluye los siguientes:

Tabla 8.8. Propuesta de desarrollo de operaciones. Geotermia profunda de baja temperatura, para usos directos del calor

Ciudad	Tipo de operación	Nº de operaciones	MW(th)	GW.h/año
Burgos	Industria	1	9	31,5
Burgos	Viviendas	2	12	42,0
Palencia	Viviendas	1	5	17,5
Valladolid	Industria	1	9	31,5
Valladolid	Viviendas	2	12	42,0
Soria	Viviendas	1	6	21,0
León	Viviendas	1	5	17,5
Lérida	Viviendas	2	10	35,0
Zaragoza	Viviendas	3	18	63,0
Huesca	Viviendas	1	6	21,0
Madrid	Edificios sector terciario	2	24	84,0
Madrid	Viviendas	4	48	168,0
Albacete	Viviendas	2	12	42,0
Cuenca	Viviendas	1	6	21,0
Jaén	Viviendas	1	6	21,0
Granada	Viviendas	2	10	35,0
Murcia	Viviendas	1	5	17,5
Cartagena-Mazarrón	Agricultura	5	15	60,0
Orense	Viviendas	1	6	21,0
Lugo	Viviendas	1	6	21,0
Pontevedra	Viviendas	1	6	21,0
Vallés	Viviendas	2	12	42,0
Penedes	Viviendas	1	5	17,5

(Continuación)

Ciudad	Tipo de operación	Nº de operaciones	MW(th)	GW.h/año
Montbrió	Agricultura	2	6	24,0
Reus	Viviendas	1	5	17,5
Valencia	Viviendas	3	15	45,0
		45	**279**	**979,5**

1 Proyecto de alta entalpía en Tenerife.

2 Proyectos de media entalpía en Jaca, Madrid y Lebrija.

3 Proyectos de sistemas geotérmicos estimulados (EGS) en Vallés (Barcelona) y Xunqueira-Molgas (Ourense).

En la tabla 8.9 se presentan los datos básicos de dichos proyectos.

La potencia eléctrica propuesta para alcanzar en 2020 es de 82,25 MW(e), que para una utilización de 8.000 horas/año supone una producción eléctrica de 658 GW.h/año equivalentes a 56.588 tep/año. Se debe puntualizar sobre el carácter conservador del escenario considerado al contemplar sólo proyectos cuya fase exploratoria ha comenzado, lo que permite catalogar esta propuesta como de mínimos posibles. Una mejora de las condiciones de mercado (tarifas, financiación) o de la política de promoción de proyectos (investigación y exploración de áreas, programa de proyectos de demostración, etc.) o de la dinamización de los procedimientos administrativos, debe conducir a un desarrollo más rápido de la capacidad instalada, de forma que la potencia instalada en 2020 superaría significativamente la cifra propuesta.

Tabla 8.9. Propuesta de desarrollo de potencial geotérmico de alta temperatura, media temperatura y EGS para producción de electricidad (escenario conservador)

Alta temperatura		
Tenerife	Temperatura de producción/ inyección	200 ºC/80 ºC
	Rendimiento de generación	0,13-0,14
	Potencia eléctrica por doblete	2.500 kW(e)
	Número total de dobletes	20
	Potencia total central	50 MW(e)
Media temperatura		
Yacimiento de Jaca	Temperatura de producción/ inyección	160 ºC/80 ºC
	Rendimiento de generación	0,08-0,10
	Potencia eléctrica por doblete	1.330 kW(e)
	Número total de dobletes	6
	Potencia total central	8 MW(e)

(Continuación)

Media temperatura		
Yacimiento de Lebrija	Temperatura de producción/ inyección	150 ºC/80 ºC
	Rendimiento de generación	0,08-0,10
	Potencia eléctrica por doblete	1.12 kW(e)
	Número total de dobletes	6
	Potencia total central	7,2 MW(e)
Yacimiento de Madrid	Temperatura de producción/ inyección	140 ºC/80 ºC
	Rendimiento de generación	0,08-0,10
	Potencia eléctrica por doblete	625 kW(e)
	Número total de dobletes	6
	Potencia total central	3,75 MW(e)

EGS		
Falla occidental Vallés (Barcelona)	Profundidad de desarrollo de almacén	5 km
	Temperatura de producción/ inyección	160 ºC/80 ºC
	Rendimiento de ciclo	0,08-0,10
	Potencia eléctrica por triplete	880 kW(e)
	Número total de tripletes	6
	Potencia total central	5,3 MW(e)

(Continuación)

EGS		
Xunqueira-Molgas (Ourense)	Profundidad de desarrollo de almacén	5 km
	Temperatura de producción/ inyección	200 ºC/80 ºC
	Rendimiento de ciclo	0,08-0,10
	Potencia eléctrica por triplete	1.336 kW(e)
	Número total de tripletes	6
	Potencia total central	8 MW(e)

9 Inventario de aprovechamientos geotérmicos de muy baja y baja temperatura en España

9.1 INVENTARIO DE APROVECHAMIENTOS DE MUY BAJA TEMPERATURA

9.1.1 Planteamiento metodológico

El objetivo del presente inventario es disponer de una estimación, lo más ajustada a la realidad que la información disponible lo permita, del grado de aprovechamiento actual de los recursos geotérmicos de muy baja temperatura en España.

La ausencia de un inventario de instalaciones geotérmicas, bien a escala nacional o a nivel autonómico, dificulta notablemente la valoración del uso actual de esta energía. Si bien algunas comunidades autónomas disponen de una relación de las instalaciones financiadas a través de subvenciones en su ámbito administrativo, se trata de información amparada por la normativa en materia de protección de datos, por lo que no ha sido posible acceder a la misma. En tales circunstancias, se optó por emprender una estrategia de consultas a las empresas del sector geotérmico, mediante el envío por correo electrónico de un sencillo cuestionario en el que se solicitaban datos acerca del número, características y ubicación de las instalaciones realizadas por cada una de ellas. Dicho envío iba acompañado de una carta de presentación suscrita por el Director de Energías Renovables del IDAE, D. Jaume Margarit y Roset.

El cuestionario se remitió a un total de 58 empresas distribuido en dos envíos: el primero a la totalidad de las mismas y el segundo sólo a las que, transcurrido el plazo fijado inicialmente, no habían enviado aún sus respuestas. Pese a ello, el número de empresas que respondió a la consulta fue de sólo 22 (37,9%), de las que 19 enviaron el cuestionario cumplimentado, dos manifestaron no desarrollar actualmente actividad en el sector y la restante se ocupaba sólo de la distribución de equipos. Con el fin de garantizar la confidencialidad de las empresas consultadas, tanto de las que respondieron al cuestionario como de las que no lo hicieron, y con el fin de facilitar al IDAE la difusión de la presente Memoria si lo creyese oportuno, toda la información que hace referencia a las razones sociales de dichas empresas aparece recogida exclusivamente en el Anexo 2 de este Informe, mientras que en la Memoria sólo aparecen los datos agregados. El Anexo 2.1 refleja la relación alfabética de las empresas que respondieron a la encuesta así como las fechas en las que lo hicieron, mientras que en el Anexo 2.2 figuran las que no enviaron respuesta alguna. El Anexo 2.3 reproduce los cuestionarios recibidos, mientras que el Anexo 2.4 refleja la potencia total correspondiente a las instalaciones facilitadas por cada una de las empresas.

Con el fin de completar la información obtenida a través del envío del cuestionario, se ha llevado a cabo una recopilación de diversos documentos de reciente publicación, en los que se describe de forma monográfica una serie de aprovechamientos geotérmicos realizados en España en los últimos años. Entre los citados documentos, los más relevantes son los siguientes:

- Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid – Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. *Proyectos Emblemáticos en el Ámbito de la Energía*. Madrid, 2009.
- Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid – Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. *Proyectos Emblemáticos en el Ámbito de la Energía Geotérmica*. Madrid, 2010.
- Libro de Actas del *I Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria (GeoEner 2010*). Madrid, 2008.
- Libro de Actas del *II Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria (GeoEner 2008*). Madrid, 2010.
- Suplemento Especial revistas NT. *Nuevas Tecnologías* (nº 19) y *El Instalador* (nº 460). Febrero 2009.
- Revista *Ingeniería Civil*. Número 156. Octubre-Noviembre-Diciembre 2009.
- Revista *Obras Urbanas*. Número 14. Marzo-Abril 2009.
- Revista *Obras Urbanas*. Número 18. Noviembre-Diciembre 2009.
- Revista *Obras Urbanas*. Número 20. Marzo-Abril 2010.
- Revista *IngeoPres*. Número 189. Enero-Febrero 2010.
- Comunicaciones del *I Fórum de la Energía Geotérmica*. Barcelona, 2010.
- *Páginas WEB*: ciudad de Barcelona, empresas de perforación, instalación y suministros, hoteles, etc.

Para evitar superposiciones con la información obtenida a través de los cuestionarios, se han

revisado cuidadosamente los datos relativos al emplazamiento, potencia instalada, tipo de aprovechamiento, etc. de cada instalación hallada en la bibliografía y se han comparado con los facilitados por las empresas, excluyéndose, naturalmente, aquéllos en los que se existía coincidencia.

9.1.2 Análisis y valoración de resultados

Puesto que la información empleada para elaborar el inventario procede de dos fuentes –cuestionarios y consultas bibliográficas–, se ha optado por tratar de forma independiente los de una y otra fuentes y, posteriormente, realizar un tratamiento global del conjunto de ambos.

9.1.2.1 Cuestionarios a empresas

El Anexo 2.5 recoge en una tabla la totalidad de la información aportada por las empresas, en la que figuran datos de instalaciones geotérmicas situadas en las 17 comunidades autónomas. La tabla 9.1 ofrece una clasificación de dichas instalaciones por usos y potencias térmicas. Su número total asciende a **1.036**, de las que el **98,6%** (1.021) son de sistema cerrado y sólo el **1,4%** (15) de sistema abierto. La potencia térmica total de estas instalaciones es de **29.938,6 kW**, con un rango por instalación que oscila entre 2 y 1.200 kW, y un valor promedio de 29 kW.

Tabla 9.1. Clasificación por usos del número y potencia de las instalaciones incluidas en los cuestionarios

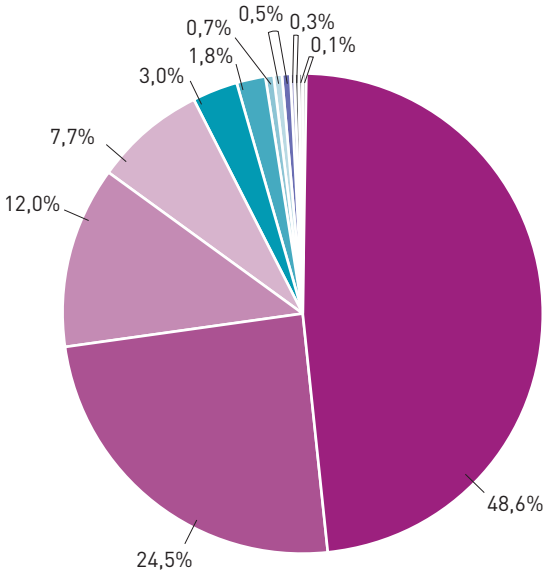
Uso	Nº instalaciones	Potencia térmica (kW)
Sólo calefacción	3	57,0
Sólo refrigeración	31	1.082,0
Sólo ACS	3	52,8
Calefacción + refrigeración	80	5.101,5
Calefacción + ACS	254	4.944,5
Refrigeración + ACS	124	1.964,0
Calefacción + refrigeración + ACS	503	14.786,5
ACS + piscina	1	6,0
Calefacción + ACS + piscina	5	78,0
Calefacción + refrigeración + ACS + piscina	19	1.089,0
Sólo piscina	5	78,0
Otros usos	1	0,0
Uso no indicado	7	699,4
Total	**1.036**	**29.938,6**

La Figuras 9.1 y 9.2 reflejan de forma gráfica las distribuciones porcentuales por usos del número de instalaciones y de la potencia térmica. Estos resultados indican que los sistemas que aúnan los servicios de **calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS)** son los más numerosos (**48,6%**) y también los que mayor potencia térmica concentran (**49,4%**). En términos exclusivamente de potencia, el segundo y tercer lugar corresponden, respectivamente, a los sistemas de calefacción + refrigeración (17%) y calefacción + ACS (16,5%), mientras que por número de instalaciones estas posiciones estarían ocupadas por los de calefacción + ACS (24,5%) y refrigeración + ACS (12%).

La tabla 9.2 refleja la clasificación por CC AA y provincias de los datos de los cuestionarios. Si bien todas las primeras aparecen representadas, en el caso de las provincias su número asciende a 42. Las 8 restantes que no disponen de datos son las de Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Sevilla, Las Palmas de Gran Canaria, Albacete y Badajoz, a las que hay que sumar las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Según se observa en la Figura 9.3, **las comunidades autónomas con mayor potencia instalada son, por este orden, Cataluña (10.700,7 kW), Madrid (4.763,1 kW) y País Vasco (3.990,3 kW)**, que representan, respectivamente, el **35,7%,**

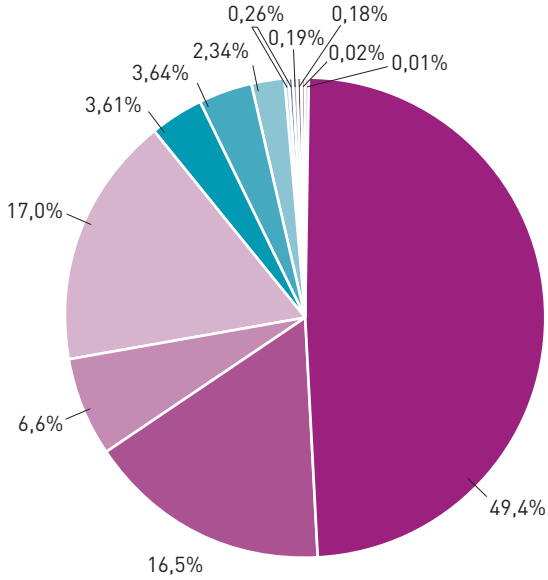
15,9% y 13,3% de la potencia térmica total recogida a través de los cuestionarios. De igual modo, **las provincias con mayor potencia instalada** (Figuras 9.4 y 9.5) **son Barcelona, Madrid y Vizcaya, con sendos valores de 7.066,8 kW (23,6%), 4.763,1 kW (15,9%) y 2.190,2 kW (7,3%)**.

Figura 9.1. Distribución por usos del número de instalaciones



- Calefacción+refrigeración+ACS
- Calefacción+ACS
- Refrigeración+ACS
- Calefacción+refrigeración
- Sólo refrigeración
- Calefacción+refrigeración+ACS+piscina
- Uso no indicado
- Calefacción+ACS+piscina
- Sólo piscina
- Sólo calefacción
- Sólo ACS
- ACS+piscina
- Otros usos

Figura 9.2. Distribución por usos de la potencia térmica instalada



- Calefacción+refrigeración+ACS
- Calefacción+ACS
- Refrigeración+ACS
- Calefacción+refrigeración
- Sólo refrigeración
- Calefacción+refrigeración+ACS+piscina
- Uso no indicado
- Calefacción+ACS+piscina
- Sólo piscina
- Sólo calefacción
- Sólo ACS
- ACS+piscina
- Otros usos

Tabla 9.2. Clasificación por CC AA y provincias de los datos de los cuestionarios

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)
Andalucía	Cádiz	307,1
	Almería	100,0
	Málaga	28,0
	Total	435,1
Aragón	Huesca	300,0
	Teruel	29,0
	Zaragoza	156,0
	Total	485,0
Canarias	Sta. Cruz de Tenerife	30,0
Cantabria	Cantabria	593,0
Castilla-La Mancha	Ciudad Real	29,4
	Cuenca	546,0
	Guadalajara	342,0
	Toledo	650,5
	Total	1.567,9

(Continuación)

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)
Castilla y León	Ávila	28,0
	Burgos	488,0
	León	139,0
	Palencia	146,0
	Salamanca	18,0
	Segovia	295,0
	Soria	174,0
	Valladolid	268,5
	Zamora	160,0
	Total	1.716,5
Cataluña	Barcelona	7.066,8
	Girona	1.254,9
	Lleida	1.520,0
	Tarragona	859,0
	Total	10.700,7
Comunidad de Madrid	Madrid	4.763,1
Comunidad Foral de Navarra	Navarra	1.241,0
Comunidad Valenciana	Alicante	72,4
	Castellón	425,7
	Valencia	896,3
	Total	1.394,4
Extremadura	Cáceres	15,0

(Continuación)

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)
Galicia	A Coruña	158,0
	Lugo	864,8
	Ourense	140,0
	Pontevedra	774,0
	Total	1.936,8
Islas Baleares	Baleares	403,0
La Rioja	Rioja	10,0

(Continuación)

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)
País Vasco	Alava	906,1
	Guipúzcoa	894,0
	Vizcaya	2.190,2
	Total	3.990,3
Principado de Asturias	Asturias	647,0
Región de Murcia	Murcia	9,9
	Total nacional	**29.938,6**

Figura 9.3. Distribución por CC AA de la potencia térmica instalada

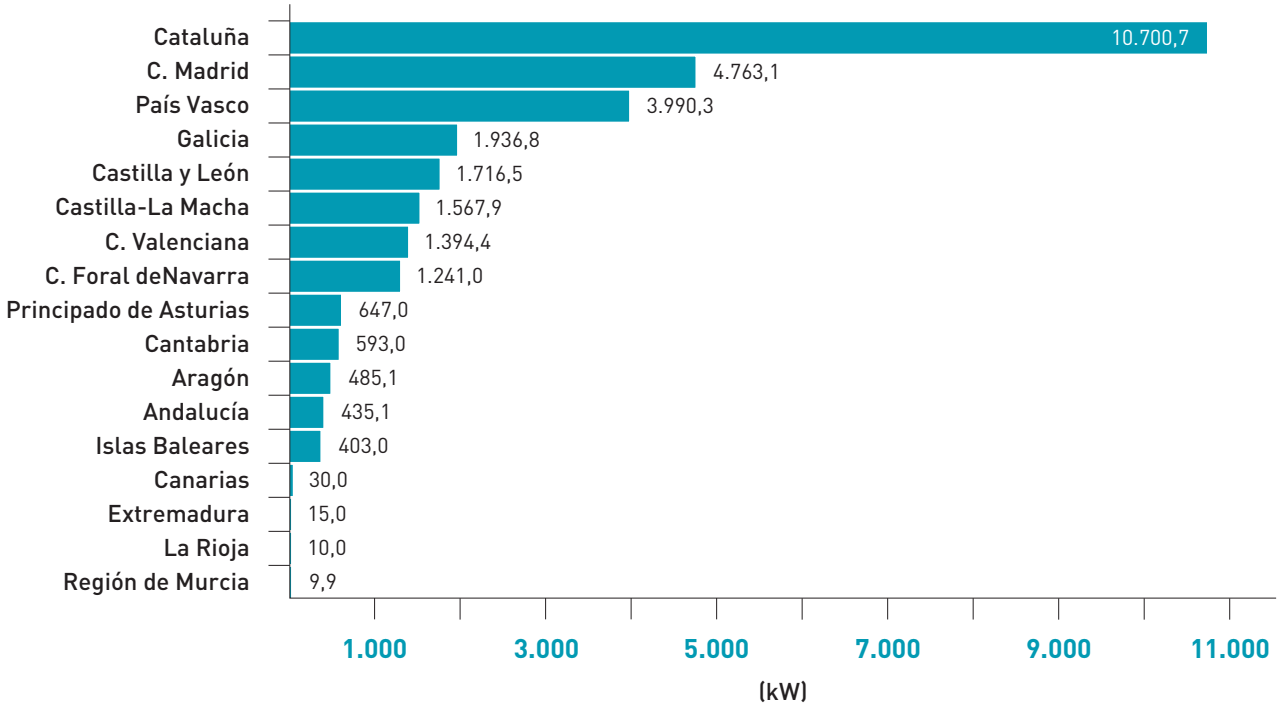


Figura 9.4. Distribución por provincias de la potencia térmica instalada

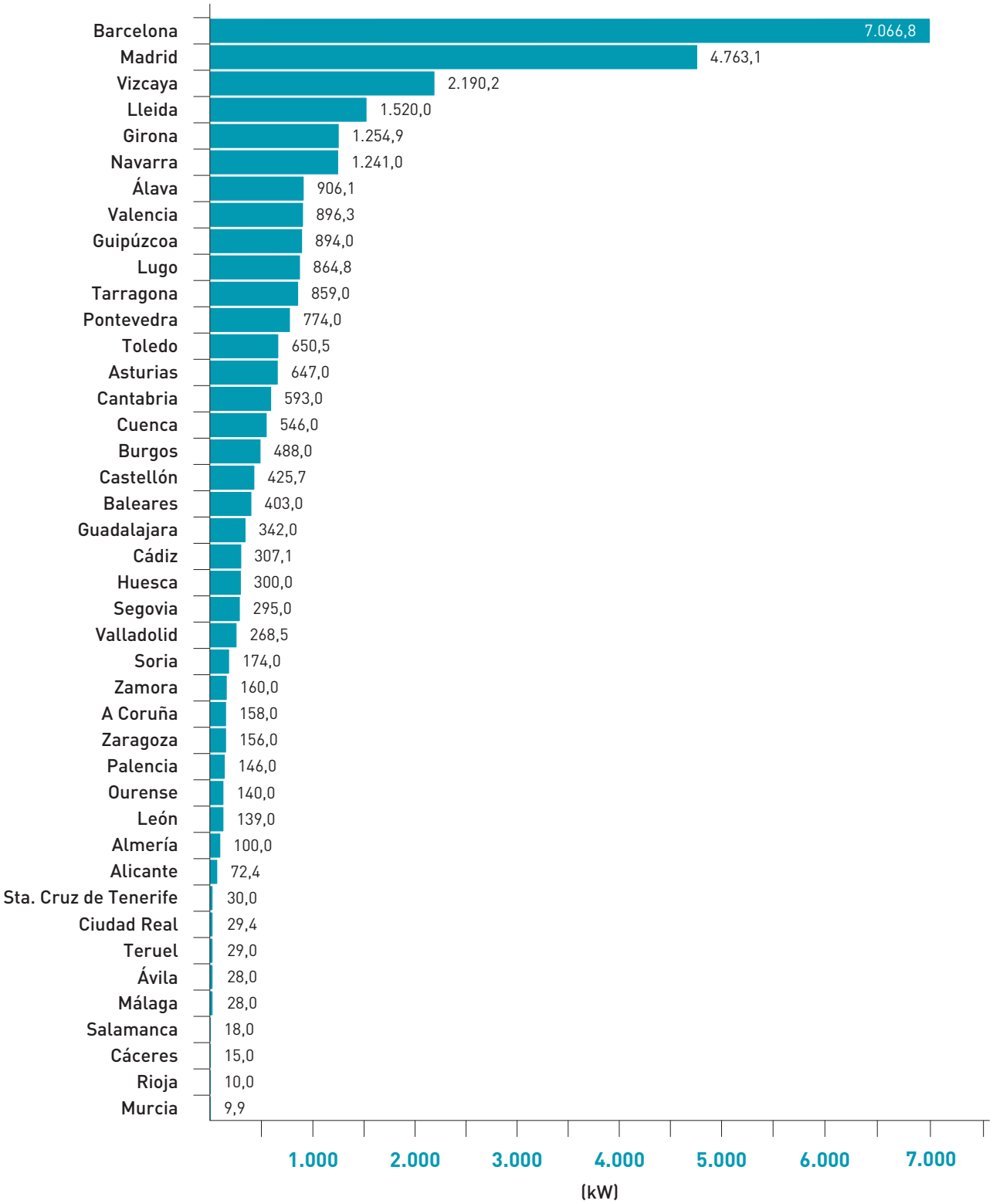


Figura 9.5. Distribución de la potencia instalada por CC AA y provincias

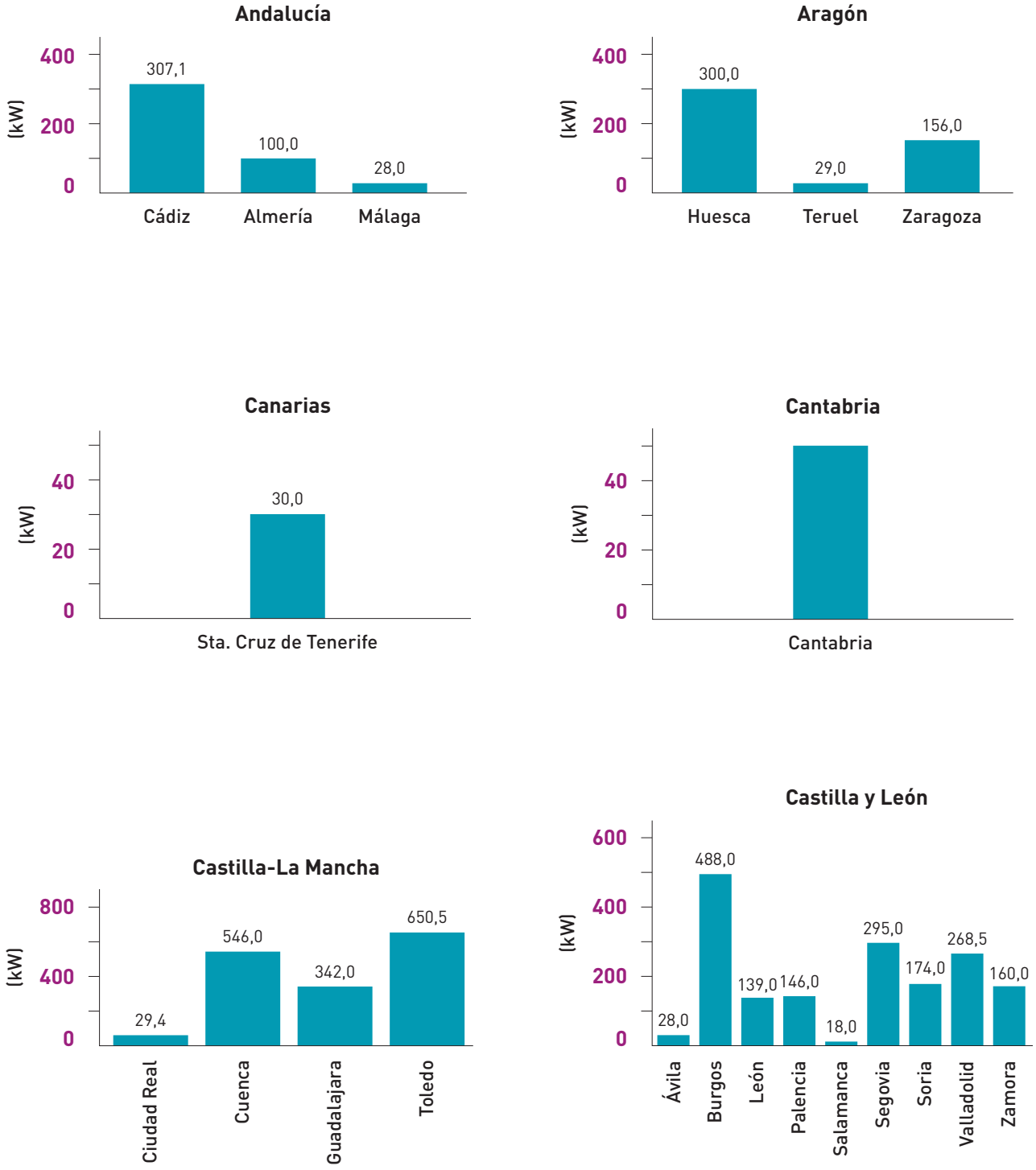


Figura 9.5 (cont.). Distribución de la potencia instalada por CC AA y provincias

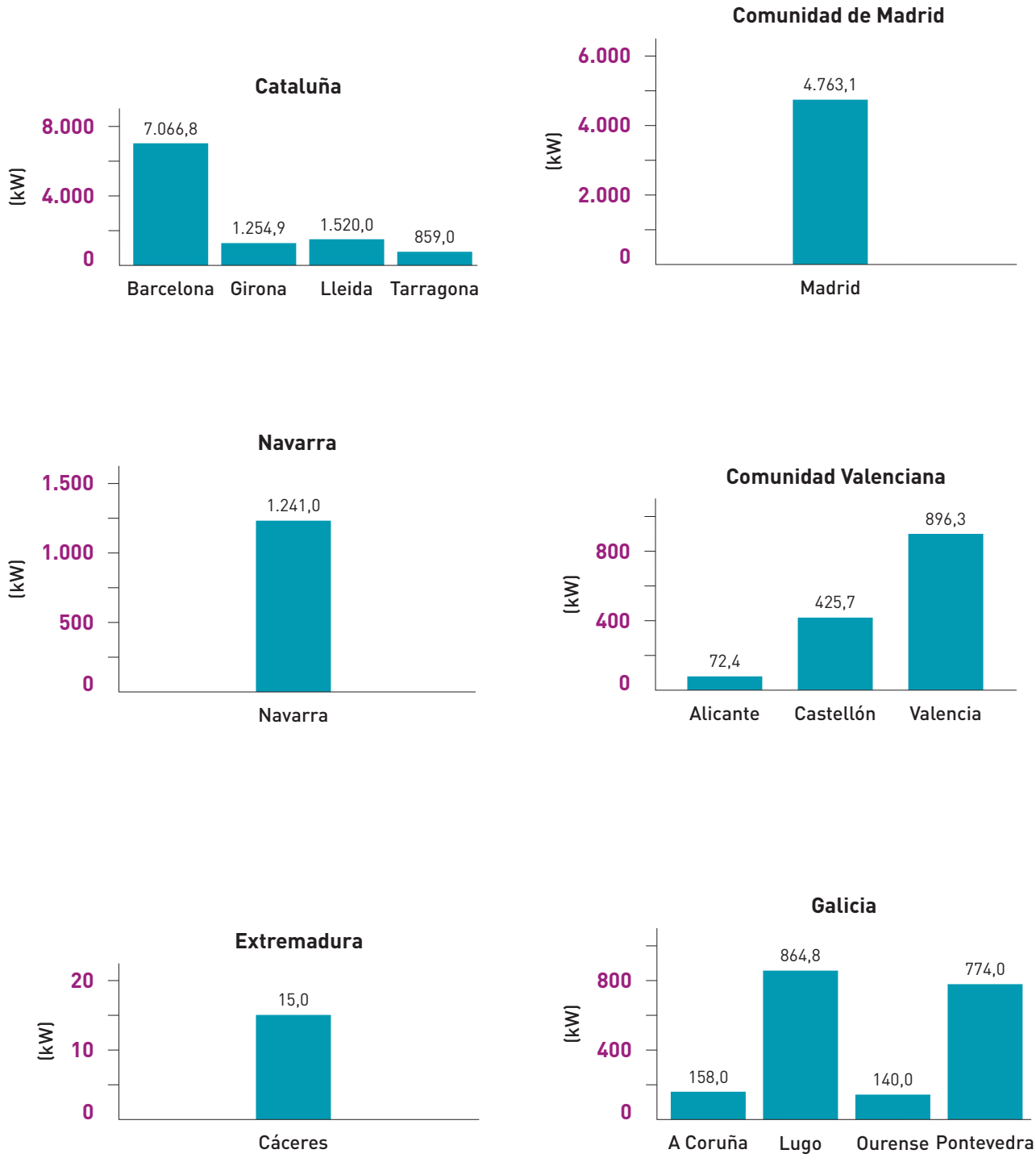
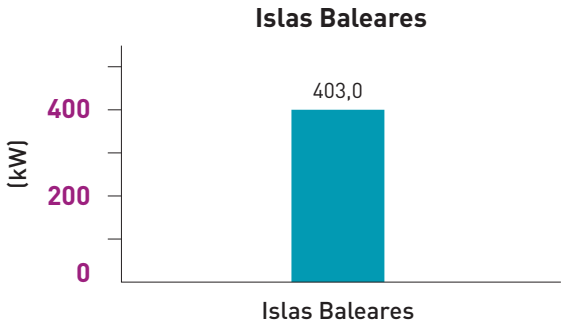
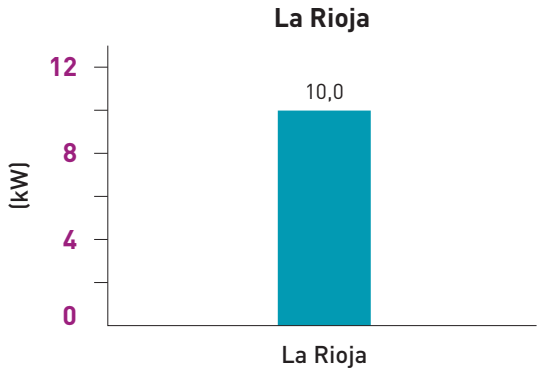
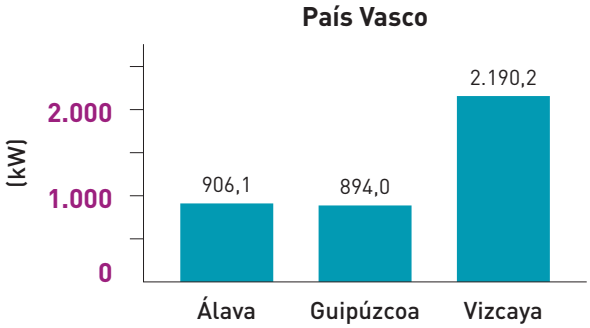
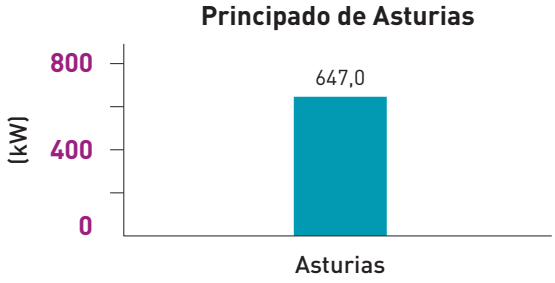


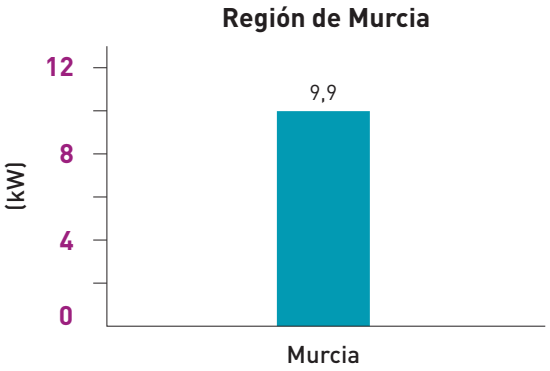
Figura 9.5 (cont.). Distribución de la potencia instalada por CC AA y provincias











9.1.2.2 Información recopilada a través de bibliografía

El Anexo 2.6 refleja de forma pormenorizada la información adicional recogida mediante la ya citada recopilación bibliográfica. Como era previsible, parte de la información recogida en los cuestionarios aparece también en diversas referencias bibliográficas, en cuyo caso obviamente se ha excluido para evitar duplicidades.

El número total de instalaciones detectadas a través de la bibliografía asciende a **43**. No obstante, como puede comprobarse en el citado anexo, la información de cada instalación no siempre es completa (faltan algunos datos relativos a ubicación, uso o potencia instalada). Con las reservas que representan estas limitaciones, en la tabla 9.3 se ha incluido la clasificación de estas nuevas instalaciones por usos y potencias térmicas, junto con la de los cuestionarios y la resultante de la suma de ambas. El resultado final es de **1.079 instalaciones**, de las que el **97,5%** (1.052) son de sistema cerrado, el **2,0%** (22) de sistema abierto y en las **5** restantes (**0,5%**) se desconoce el sistema. La potencia instalada del conjunto asciende a **36.273,7 kW**, con un rango por instalación que oscila entre **2 y 4.000 kW**, y un valor promedio de **34,3 kW**.

Tabla 9.3. Clasificación por usos del número y potencia de las instalaciones incluidas en los cuestionarios y en la bibliografía consultada

Uso	Cuestionarios		Bibliografía		Total	
	Nº instal.	Potencia (kW)	Nº instal.	Potencia (kW)	Nº instal.	Potencia (kW)
Sólo calefacción	3	57,0	3	58,7	6	115,7
Sólo refrigeración	31	1.082,0	1		32	1.082,0
Sólo ACS	3	52,8	0		3	52,8
Calefacción + refrigeración	80	5.101,5	13	5.652,0	93	10.753,5
Calefacción + ACS	254	4.944,5	2	86,4	256	5.030,9
Refrigeración + ACS	124	1.964,0			124	1.964,0
Calefacción + refrigeración + ACS	503	14.786,5	11	245,9	514	15.032,4
ACS + piscina	1	6,0			1	6,0
Calefacción + ACS + piscina	5	78,0			5	78,0
Calefacción + refrigeración + ACS + piscina	19	1.089,0			19	1.089,0
Sólo piscina	5	78,0			5	78,0
Otros usos	1	0,0			1	0,0
Uso no indicado	7	699,4	13	292,0	20	991,4
Total	**1.036**	**29.938,6**	**43**	**6.335,0**	**1.079**	**36.273,7**

La Figuras 9.6 y 9.7 reflejan de forma gráfica las distribuciones porcentuales por usos del número de instalaciones y de la potencia térmica, considerando la totalidad de la información disponible (cuestionarios y encuestas).

Figura 9.6. Distribución por usos del número total de instalaciones inventariadas

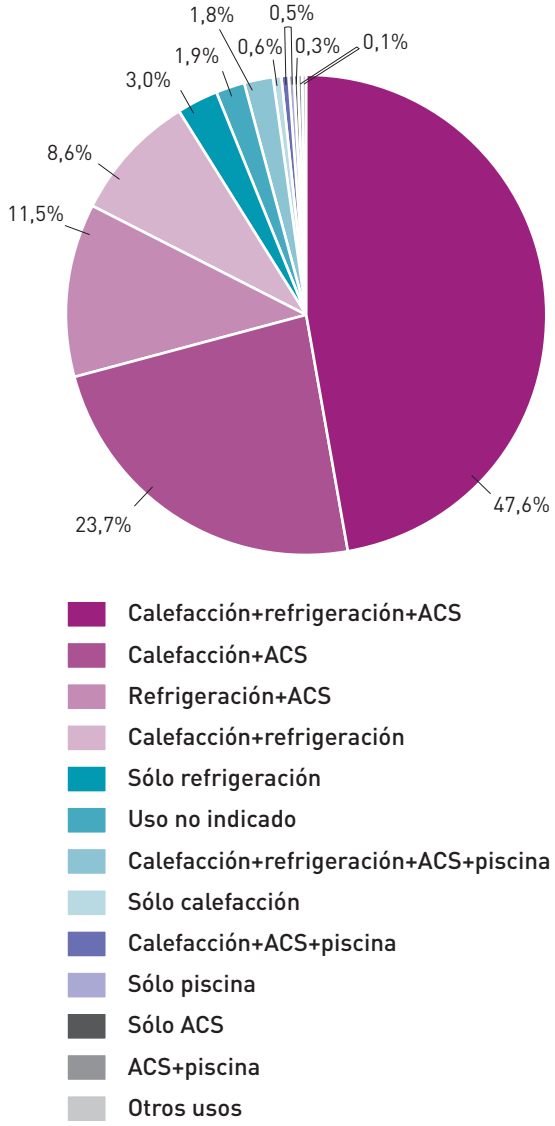
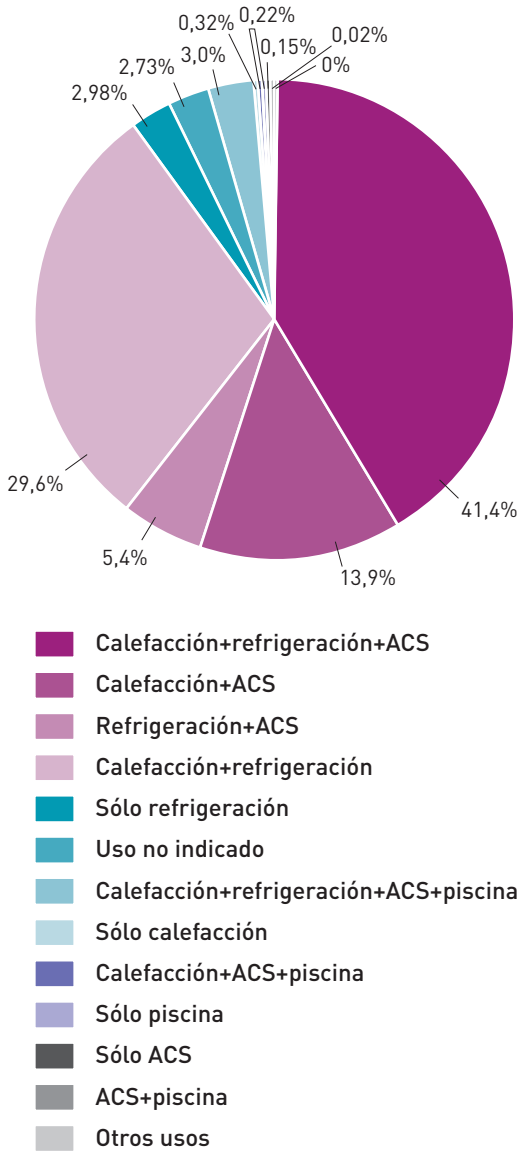


Figura 9.7. Distribución por usos de la potencia térmica instalada de todas las instalaciones inventariadas



Según estos resultados, al igual que cuando se consideraron sólo los cuestionarios, los sistemas de **calefacción + refrigeración + ACS** siguen siendo los más numerosos (**47,6%**) y también los que mayor potencia térmica concentran (**41,4%**). En términos exclusivamente de potencia, el segundo y tercer lugar corresponden también, respectivamente, a los sistemas de calefacción + refrigeración (29,6%) y calefacción + ACS (13,9%), mientras que por número de instalaciones estas posiciones seguirían estando ocupadas por los de calefacción + ACS (23,7%) y refrigeración + ACS (11,5%).

La tabla 9.4 refleja la clasificación por CC AA y provincias de los datos de la totalidad del inventario. A diferencia de los cuestionarios, el número de estas últimas se eleva a 43, al haberse incorporado Sevilla, por lo que las que no disponen de datos son ahora las de Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Las Palmas de Gran Canaria, Albacete y Badajoz, y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla.

Por último, según se observa en la Figura 9.8, **las comunidades autónomas con mayor potencia instalada son, por este orden, Cataluña (10.885,7 kW), Madrid (5.326,0 kW) y Andalucía (4.435,1 kW)**, que representan, respectivamente, el **30,5%, 14,9% y 12,4%** de la potencia térmica total. De igual modo, **las provincias con mayor potencia instalada** (Figuras 9.9 y 9.10) **son Barcelona, Madrid y Sevilla, con sendos valores de 7.131,8 kW (19,7%), 5.326 kW (14,7%) y 4.000 kW (11%)**.

9.2 INVENTARIO DE APROVECHAMIENTOS DE BAJA TEMPERATURA

Se incluye en este apartado un conjunto de aprovechamientos de aguas de baja temperatura destinados a usos diversos, entre los que destacan la calefacción de recintos (sin bomba de calor), la climatización de piscinas y otras aplicaciones relacionadas con la balneología, así como la calefacción de invernaderos y suelos.

Según los datos publicados en el año 2005 por Sánchez, J. y García de la Noceda, C.[13], se tiene constancia de 11 aprovechamientos de este tipo con una capacidad total de **22,3 MWt**, y una energía anual utilizada de 347,2 TJ/año. En la tabla 9.5 se ofrece una descripción pormenorizada de los mismos.

Tabla 9.4. Clasificación por CC AA y provincias de la potencia instalada total

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)		
		Bibliografía	Cuestionarios	Total
Andalucía	Cádiz		307,1	307,1
	Sevilla	4.000,0		4.000,0
	Almería		100,0	100,0
	Málaga		28,0	28,0
	Total	4.000,0	435,1	4.435,1
Aragón	Huesca		300,0	300,0
	Teruel		29,0	29,0
	Zaragoza		156,0	156,0
	Total		485,0	485,0
Canarias	Sta. Cruz de Tenerife		30,0	30,0

[13]Sánchez Guzmán, J., García de la Noceda, C. Geothermal Energy Development in Spain Country. Update Report Proceedings. World Geothermal Congress (2005)

(Continuación)

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)		
		Bibliografía	Cuestionarios	Total
Cantabria	Cantabria		593,0	593,0
Castilla-La Mancha	Ciudad Real		29,4	29,4
	Cuenca		546,0	546,0
	Guadalajara		342,0	342,0
	Toledo		650,5	650,5
	Total		1.567,9	1.567,9
Castilla y León	Ávila		28,0	28,0
	Burgos		488,0	488,0
	León		139,0	139,0
	Palencia		146,0	146,0
	Salamanca		18,0	18,0
	Segovia	12,0	295,0	307,0
	Soria		174,0	174,0
	Valladolid	44,0	268,5	315,5
	Zamora		160,0	160,0
	Total	56,0	1.716,5	1.772,5
Cataluña	Barcelona	65,0	7.066,8	7.131,8
	Girona		1.254,9	1.254,9
	Lleida	120,0	1.520,0	1.640,0
	Tarragona		859,0	859,0
	Total	185,0	10.700,7	10.885,7
Comunidad de Madrid	Madrid	562,9	4.763,1	5.326,0
Comunidad Foral de Navarra	Navarra		1.241,0	1.241,0

(Continuación)

Comunidad Autónoma	Provincia	Potencia térmica (kW)		
		Bibliografía	Cuestionarios	Total
Comunidad Valenciana	Alicante		72,4	72,4
	Castellón		425,7	425,7
	Valencia	20,0	896,3	916,3
	Total	20,0	1.394,4	1.414,4
Extremadura	Cáceres		15,0	15,0
Galicia	A Coruña		158,0	158,0
	Lugo		864,8	864,8
	Ourense	50,0	140,0	190,0
	Pontevedra	76,0	774,0	850,0
	Total	126,0	1.936,8	2.062,8
Islas Baleares	Baleares		403,0	403,0
La Rioja	Rioja		10,0	10,0
País Vasco	Álava		906,1	906,1
	Guipúzcoa	45,9	894,0	939,9
	Vizcaya	10,4	2.190,2	2.200,6
	Total	56,3	3.990,3	4.046,6
Principado de Asturias	Asturias	746,8	647,0	1.393,8
Región de Murcia	Murcia		9,9	9,9
Sin determinar	Sin determinar	582,0		582,0
	Total nacional	**6.335,0**	**29.938,6**	**36.273,7**

Figura 9.8. Distribución por CC AA de la potencia térmica total instalada

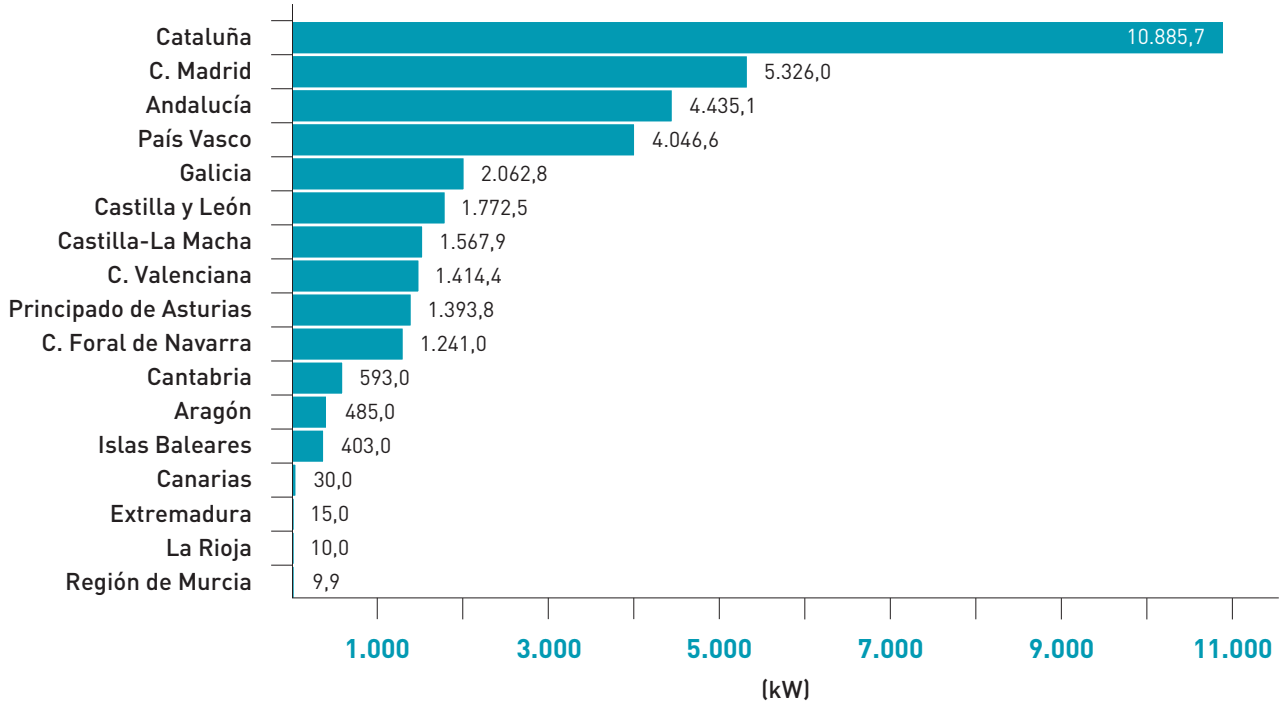


Figura 9.9. Distribución por provincias de la potencia térmica total instalada

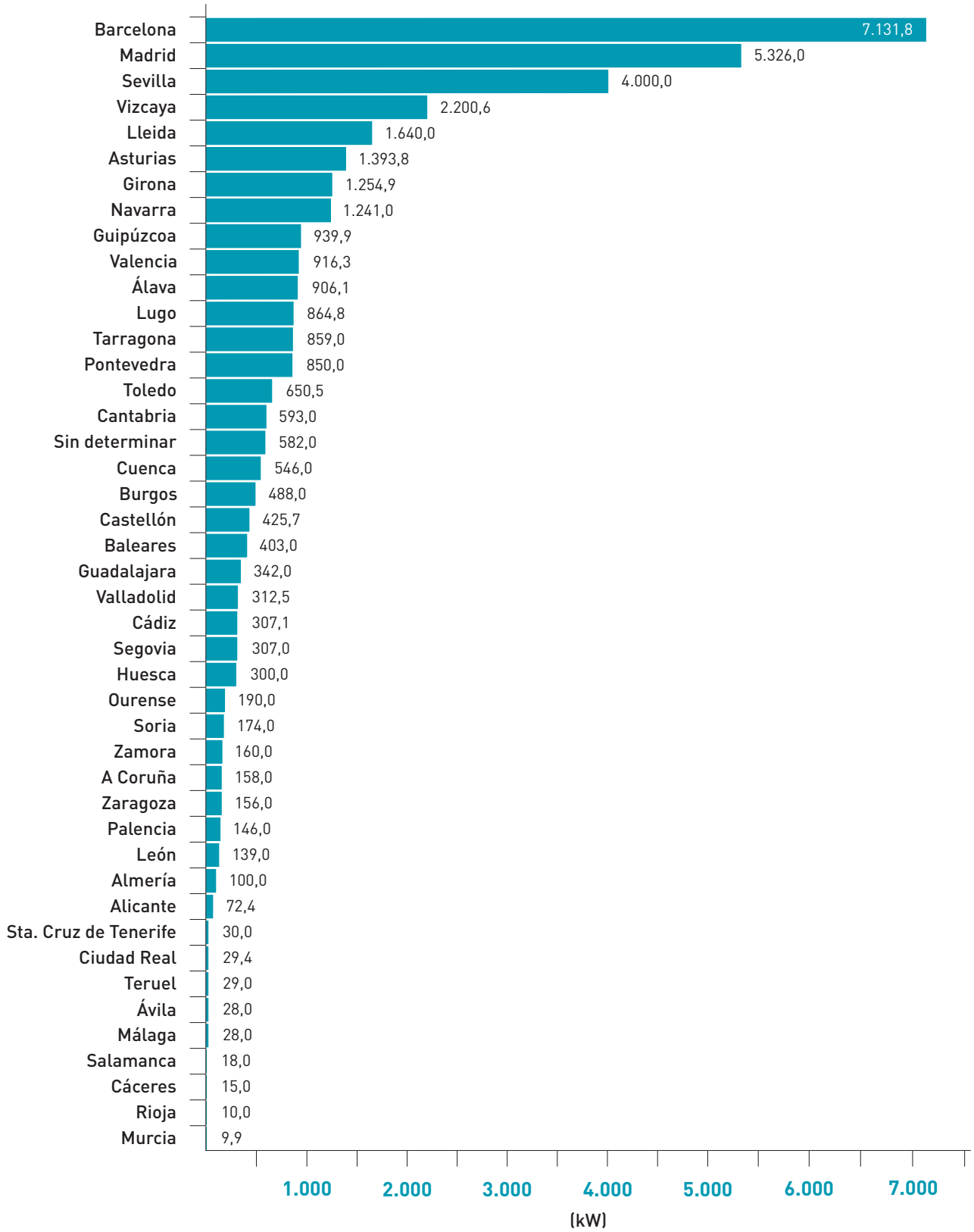


Figura 9.10. Distribución de la potencia instalada total por CC AA y provincias

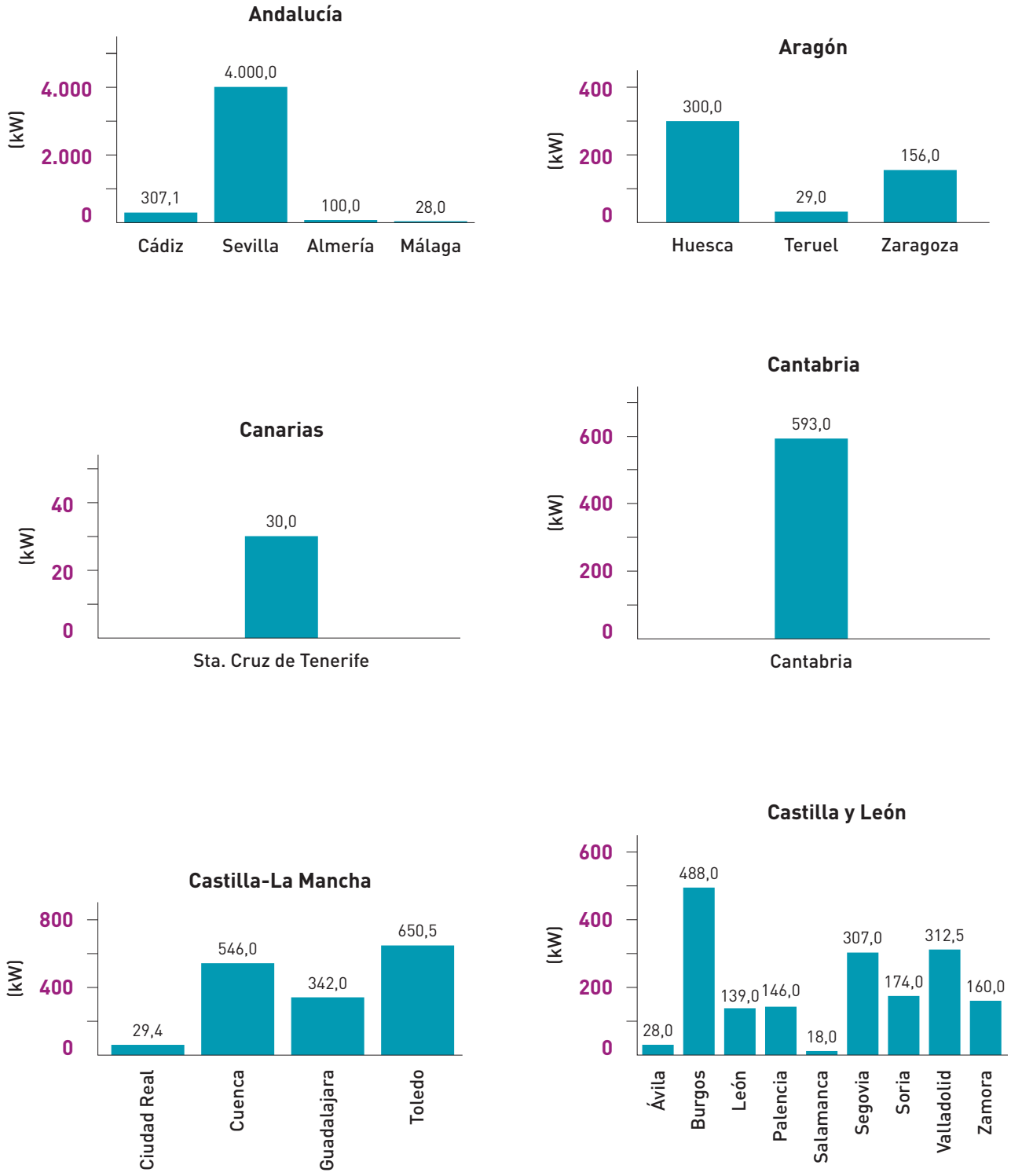
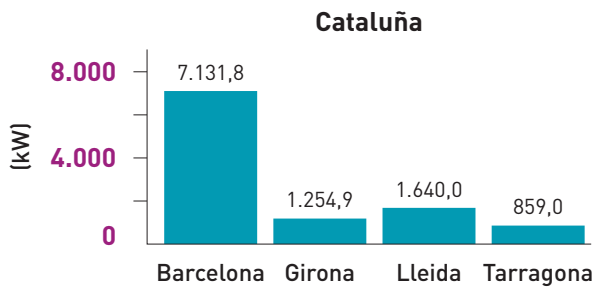
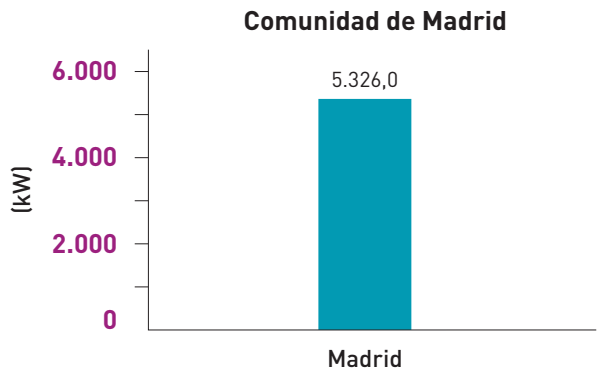
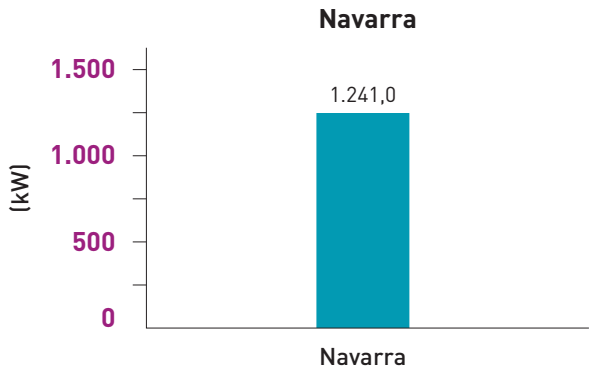
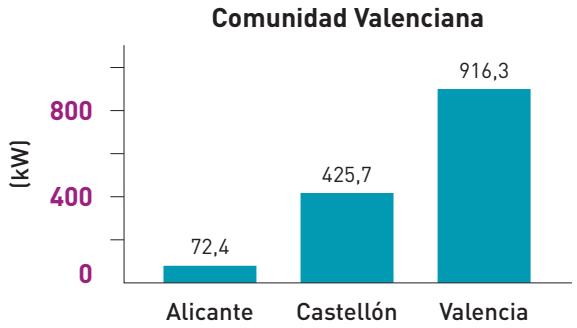


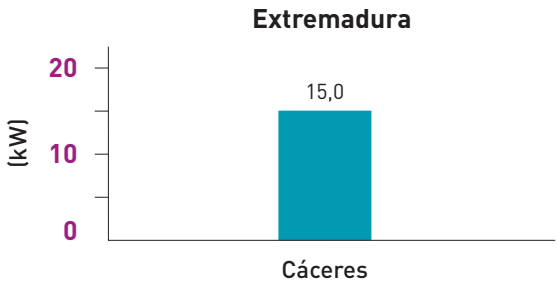
Figura 9.10. (cont.). Distribución de la potencia instalada total por CC AA y provincias











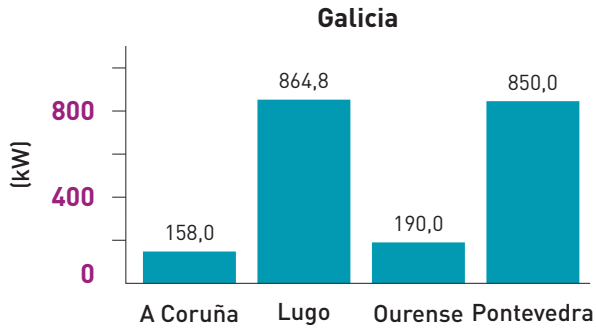
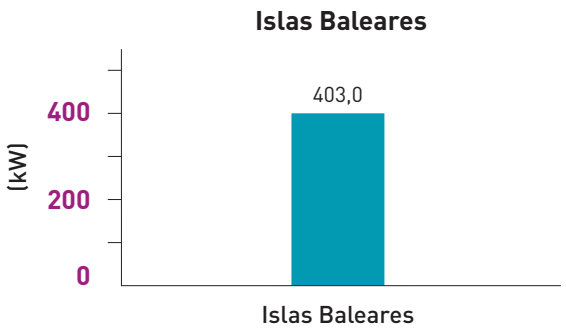
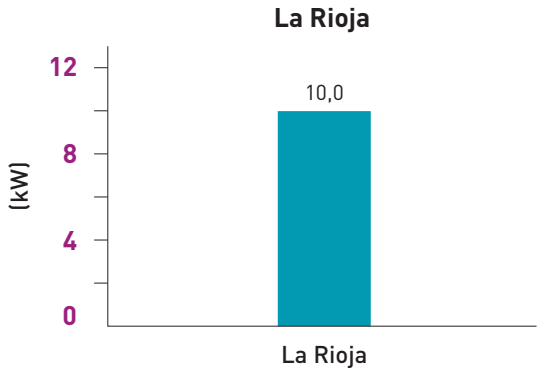
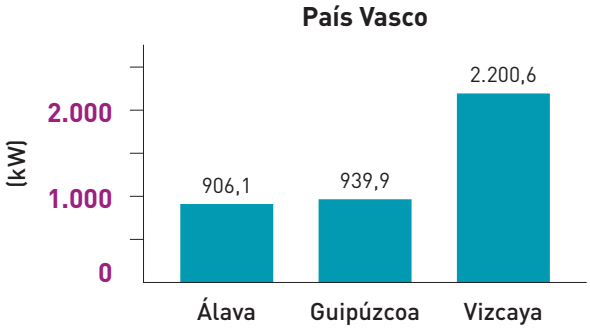
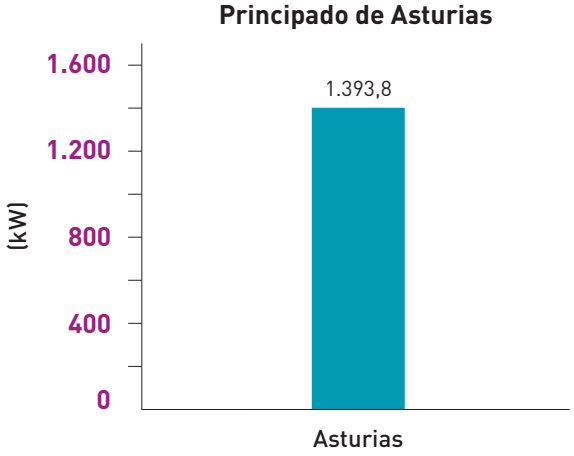


Figura 9.10. (cont.). Distribución de la potencia instalada total por CC AA y provincias









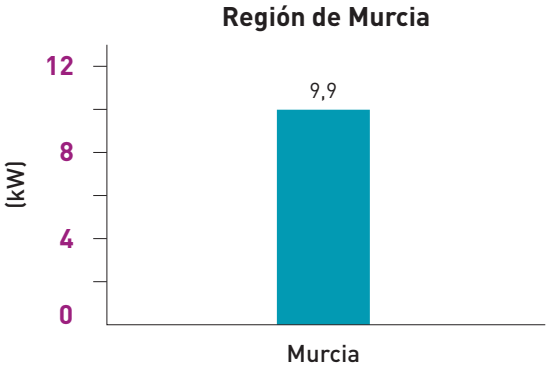


Tabla 9.5. Aprovechamientos geotérmicos de baja temperatura en España

Localidad	Tipo	Temperatura (ºC)		Capacidad (MWt)	Utilización anual	
		Entrada	Salida		Energía (TJ/año)	Factor de capacidad
Lérida	E	58	25	1,24	26,11	0,66
Arnedillo	E+B	50	30	0,92	21,1	0,73
Fitero	E+B	52	30	0,73	14,5	0,63
Lugo	E+B	44	25	0,32	5,01	0,50
Orense	E	75	30	0,94	23,74	0,80
Archena	E+B	48	25	0,96	18,20	0,60
Sierra Alhamilla	E+B	52	30	0,74	14,51	0,62
Montbrió	E+B	42	18	1,50	31,65	0,67
Montbrió	I	78	25	1,33	20,97	0,50
Cartagena	I	38	18	12,55	158,26	0,40
Zújar	I	45	20	1,05	13,19	0,40
Total	**-**	**-**	**-**	**22,28**	**347,24**	**-**

Notas:
E = Calefacción de espacios particulares (no incluye bombas de calor)
B = Baño y natación (incluye balneología)
I = Calefacción de invernaderos y suelos
Factor de capacidad = Utilización anual (TJ/año)/Capacidad (MW_t) x 0,03171
Fuente: Sánchez-Guzmán, J y García de la Noceda, C. *Geothermal Energy Development in Spain-Country. Update Report*. Proceedings World Geothermal Congress. 2005

10 Conclusiones y propuestas de interés a efectos del PER 2011-2020

En el presente capítulo se ofrece un resumen del resultado de los trabajos realizados por TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A. (TRT) en el marco del estudio: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN ESPAÑA PARA LA ELABORACIÓN DEL PER 2011-2020 (REF.: P.C.P. 11227.19/09), adjudicado a dicha empresa por el INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). Asimismo, se presentan sus principales conclusiones así como un conjunto de propuestas orientadas a establecer un marco más favorable para el desarrollo del potencial geotérmico de España en sus diferentes ámbitos.

10.1 ANTECEDENTES

10.1.1 Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos

10.1.1.1 Recursos y yacimientos geotérmicos

Se define el recurso geotérmico como la fracción de la energía geotérmica que puede ser aprovechada de forma técnica y económicamente viable. En este concepto se incluye desde el calor que puede encontrarse en los horizontes más superficiales del suelo, hasta el almacenado en rocas situadas a grandes profundidades.

Para extraer dicho calor es necesario disponer de un fluido que lo transporte hasta la superficie, a cuyo fin se emplean sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales o bien intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad. El fluido geotérmico es, generalmente, el agua presente en el subsuelo –en estado líquido o en forma de vapor– si bien también se emplean otros fluidos de intercambio que se bombean desde la superficie. Una vez alcanzada esta última, el fluido geotérmico se somete a los procesos necesarios para que la energía que transporta pueda ser aprovechada. Tales procesos dependen fundamentalmente del nivel térmico del fluido, según el cual se distinguen los siguientes tipos de recursos:

- Recursos geotérmicos de alta entalpía: Tª > 150 ºC.
- Recursos geotérmicos de media entalpía: Tª: 100-150 ºC.
- Recursos geotérmicos de baja entalpía: Tª: 30-100 ºC.
- Recursos geotérmicos de muy baja entalpía: Tª < 30 ºC.

Estos recursos dan lugar a otros tantos tipos de yacimientos geotérmicos, concepto que puede definirse como el *espacio físico en el interior de la corteza terrestre con unas determinadas condiciones geológicas, en el que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es económicamente viable*. Dicho concepto no suele emplearse en el caso de los recursos de muy baja temperatura.

Además de los yacimientos de alta, media y baja entalpía existen los denominados *yacimientos geotérmicos no convencionales*, que constituyen casos singulares de los de alta entalpía, entre los que se incluyen:

- *Yacimientos de Roca Caliente Seca* (HDR: *Hot Dry Rock*) creados, mediante la aplicación de técnicas de fracturación, en materiales geológicos de escasa o nula permeabilidad y/o porosidad de alta temperatura, carentes de fluidos. Cuando existe cierta permeabilidad natural que es necesario estimular, estos yacimientos reciben el nombre de *Sistemas Geotérmicos Estimulados* (EGS: *Enhanced Geothermal System*).
- *Yacimientos geotérmicos supercríticos* (T > 300 ºC), cuyas condiciones termodinámicas permitirían la producción de electricidad y también la de hidrógeno.
- *Yacimientos geopresurizados*, en los que el agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones, superiores a la hidrostática.

10.1.1.2 Tecnologías de aprovechamiento

Los recursos de alta entalpía se emplean para la **producción directa de electricidad**, mientras que los de media entalpía pueden utilizarse también para producir electricidad mediante ciclos binarios –aunque con menores rendimientos– o bien para aplicaciones industriales. Los fluidos de baja temperatura se destinan a **usos directos del calor**, tales como la calefacción de viviendas, procesos industriales y usos agrícolas. Por último, los de muy baja temperatura se aprovechan mediante bomba de calor. Las tecnologías aplicadas en cada caso varían en función del tipo de recurso, su profundidad y el aprovechamiento previsto.

A. Tecnologías para la producción de electricidad

La energía geotérmica que se utiliza para generar electricidad proviene de tres tipos distintos

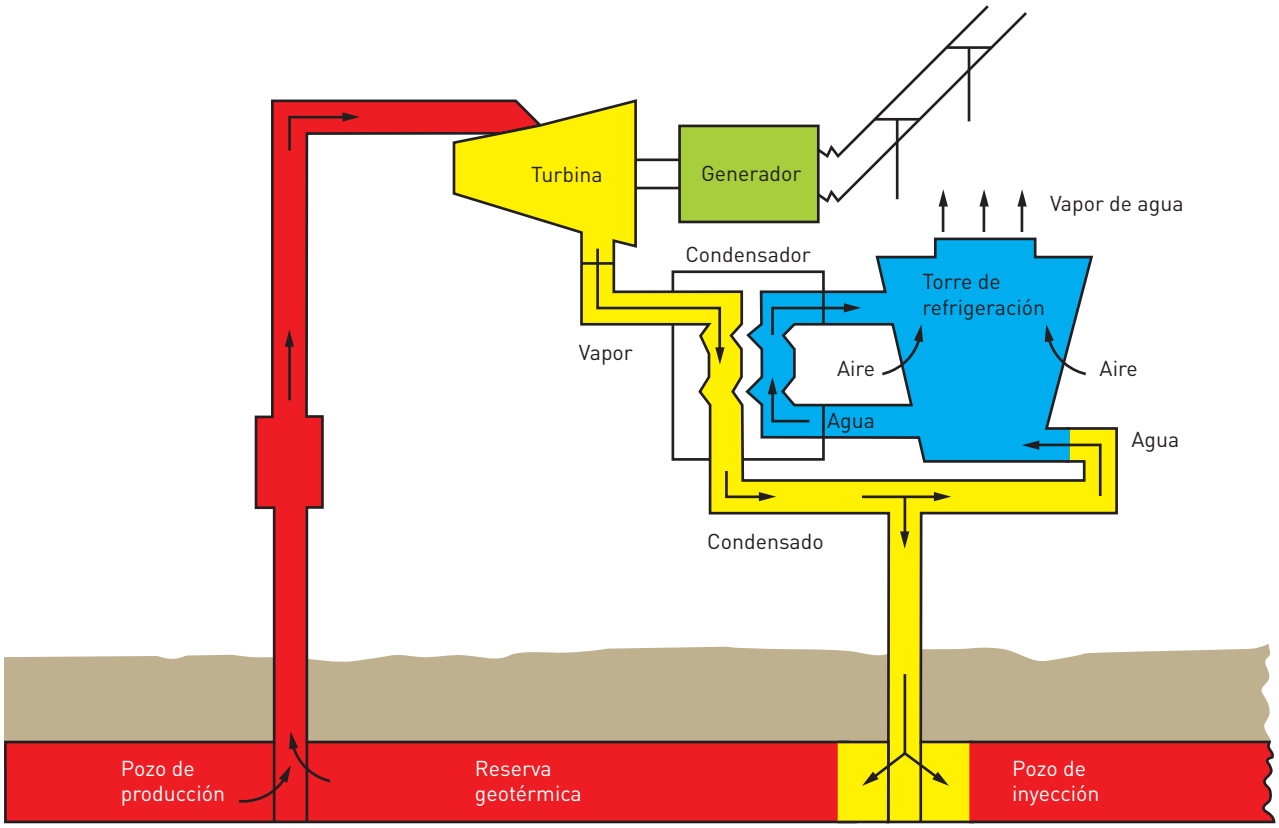
de fluidos, que representan otros tantos tipos de recursos diferentes: de vapor seco, de vapor húmedo y de entalpía moderada. En los dos primeros el vapor se emplea directamente para generar electricidad, mientras que en el tercero se hace uso de un fluido de intercambio, que se transforma en vapor merced a la energía cedida por el fluido geotérmico. La explotación de cada uno de estos recursos se realiza, respectivamente, mediante las siguientes tecnologías:

- *Plantas de vapor seco*, que utilizan un flujo directo de vapor geotérmico.
- *Plantas flash*, que utilizan una mezcla de agua líquida y vapor (hasta ahora las más habituales).
- *Plantas de ciclo binario*, que funcionan como sistemas de circuito cerrado.

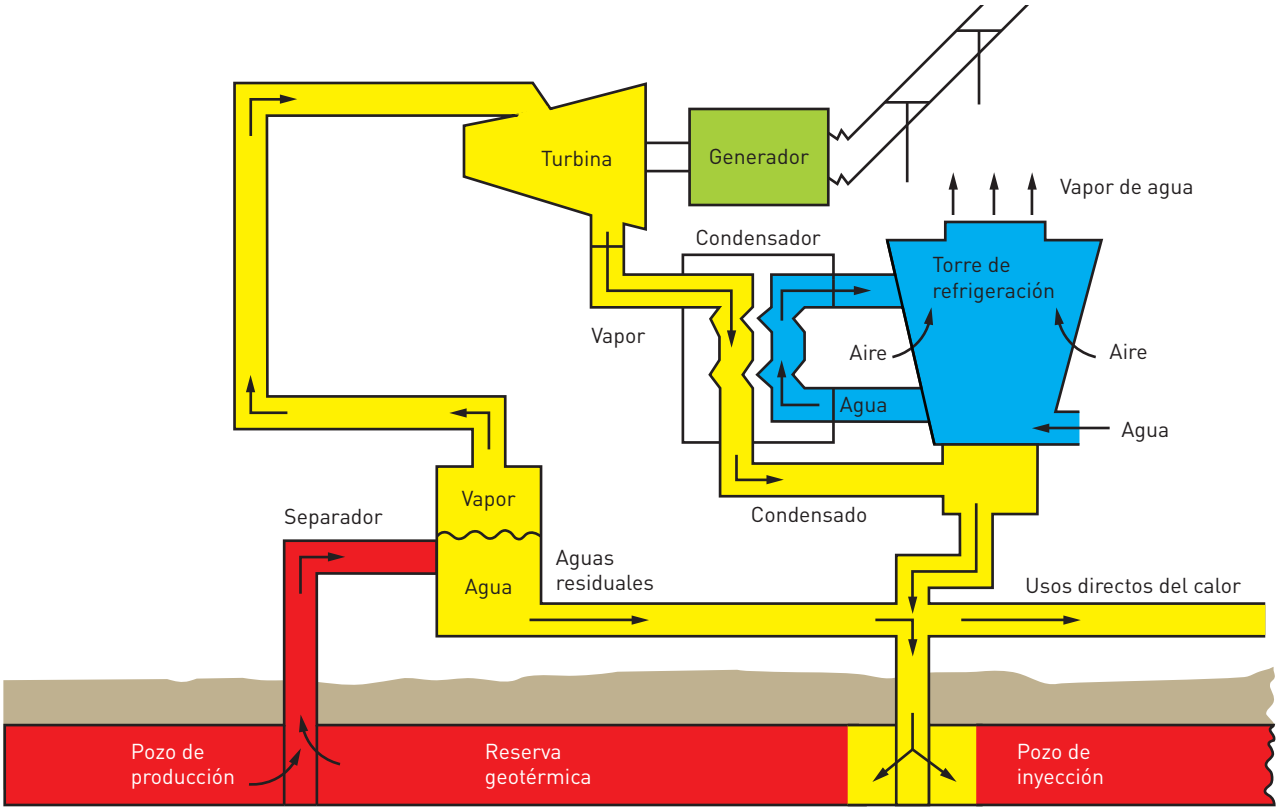
La Figura 10.1 refleja los esquemas de funcionamiento de cada una de estas plantas, a las que habría que añadir las de *ciclo combinado*, en las que se emplean ambas tecnologías: binaria y flash. Asimismo, es importante destacar los *sistemas geotérmicos híbridos*, en los que se combinan otras fuentes de energía además de la geotérmica, y las tecnologías de aprovechamiento de los ya citados *Sistemas Geotérmicos Estimulados* (EGS), aún en fase experimental.

Figura 10.1. Esquemas de funcionamiento de los diferentes tipos de plantas geotérmicas de generación de electricidad

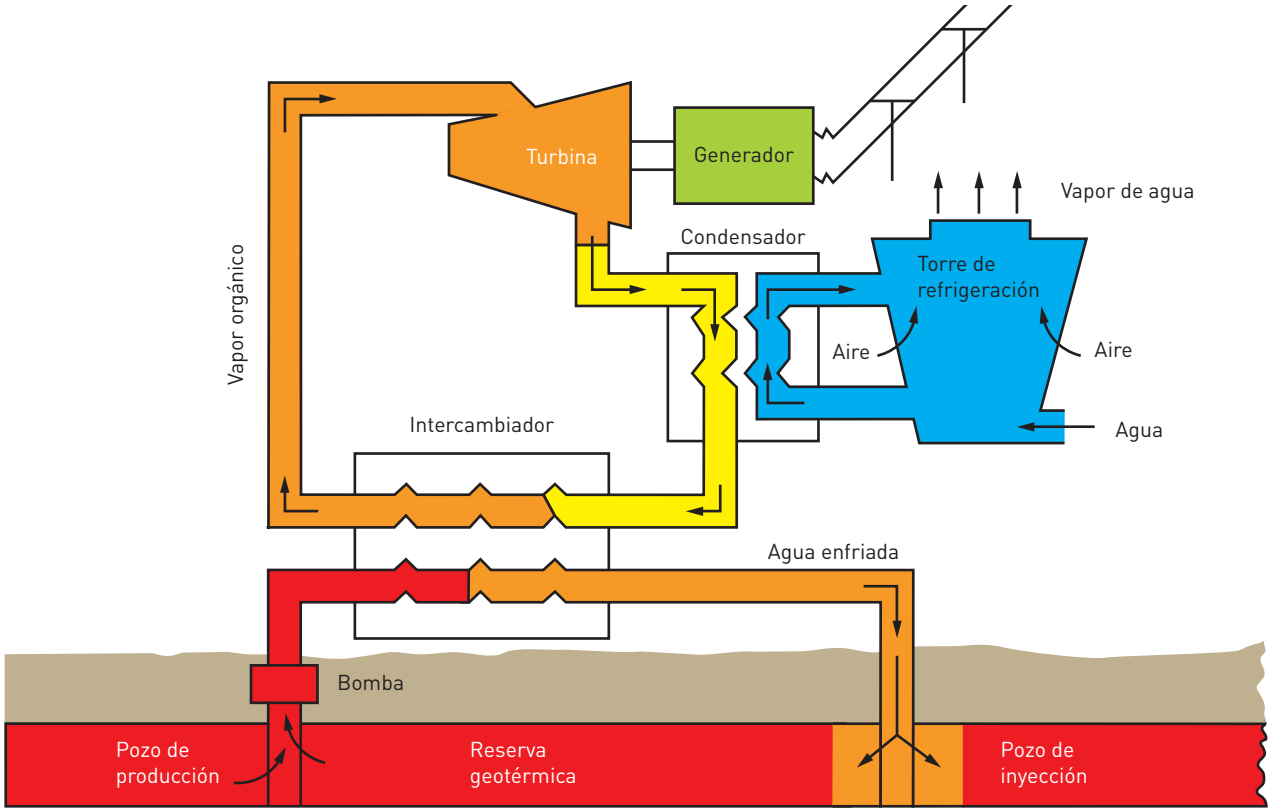
a. Planta de vapor seco



b. Planta de tecnología flash



c. Planta de ciclo binario



B. Tecnologías para el uso directo del calor

La utilización directa de la energía geotérmica incluye una amplia variedad de usos tales como piscinas climatizadas y balneoterapia, calefacción y refrigeración –incluidos los sistemas energéticos de distrito o *District Heating*–, producción de agua caliente sanitaria (ACS), acuicultura y aplicaciones agrícolas (invernaderos y calentamiento de suelos) e industriales (extracción de minerales y secado de alimentos y maderas). Las temperaturas de trabajo se distribuyen en un rango entre 30 y 150 ºC en el caso de los recursos de baja y media entalpía, habitualmente localizados a profundidades entre 1.500 y 3.500 m, y, aproximadamente, entre 15 y 20 ºC para los recursos someros o de muy baja entalpía, incluidos los acuíferos convencionales.

Yacimientos profundos

Se trata de almacenes sedimentarios profundos que albergan fluidos geotérmicos de baja y media entalpía, generalmente con un contenido elevado de sales, lo que hace necesario el empleo de intercambiadores en los que se cede el calor a otro fluido –generalmente agua– que forma parte de un circuito cerrado o secundario perteneciente a la red de distribución.

Para que su uso en sistemas de calefacción resulte rentable, se requiere una importante demanda a poca distancia del aprovechamiento, al objeto de minimizar los costes asociados a los mecanismos de transporte del calor. La explotación se realiza mediante un doblete de sondeos, uno para captar el fluido geotérmico –sondeo de extracción– y otro para reinyectarlo –sondeo de inyección–, ya enfriado, en el mismo yacimiento, lo que permite mantener la presión en el mismo y evitar el vertido de la salmuera en superficie.

Geotermia somera

Dada su estabilidad térmica frente a los cambios estacionales, el subsuelo, en sus primeros 100-200 metros, resulta un medio adecuado para proporcionar y almacenar energía térmica. De hecho, a 10-20 m de profundidad, su temperatura se mantiene prácticamente constante, incrementándose según el gradiente geotérmico al aumentar la profundidad (3 ºC cada 100 m). Las tecnologías para aprovechar esta energía almacenada en los primeros metros de la corteza terrestre son básicamente dos:

- *Bomba de calor geotérmica* (*GHP: Geothermal Heat Pump*).
- *Almacenamiento subterráneo de energía térmica* (UTES: *Underground Thermal Energy Storage*).

En ambos casos, las tecnologías desarrolladas para aprovechar el calor del subsuelo son función de la accesibilidad del recurso geotérmico, lo que da lugar básicamente a dos tipos de sistemas:

- *Circuitos abiertos*: el agua subterránea es captada como medio de transporte del calor.
- *Circuitos cerrados*: el transporte de calor corre a cargo de un fluido –agua con algún aditivo en la mayoría de los casos–, que lo extrae de los materiales existentes a poca profundidad en el subsuelo. Ello supone la instalación de un intercambiador en el propio terreno, cuya pared separa el fluido termoportador de la roca y del agua subterránea.

La **bomba de calor geotérmica** extrae calor del subsuelo a una temperatura relativamente baja, aumentándola, mediante el consumo de energía eléctrica, para posibilitar su uso posterior en sistemas de calefacción. Existe la opción de invertir el proceso en verano, inyectando en el terreno el calor absorbido en la refrigeración de la instalación a climatizar. Estas bombas funcionan del mismo modo que las bombas de calor convencionales (aire-aire y aire-agua), de manera que pueden calentar, refrigerar y, si están adecuadamente equipadas, proporcionar agua caliente sanitaria, pero con mayor eficacia que éstas.

Por último, los sistemas que conectan la bomba de calor geotérmica pueden ser, básicamente, **abiertos o cerrados**. La elección de uno u otro dependerá de diversos factores tales como la geología e hidrogeología del terreno, dimensiones y uso de la superficie disponible, existencia de fuentes potenciales de calor y características de la demanda de calor y frío de los edificios. La Figura 10.2 muestra el esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica que funciona con sondeos de captación de agua en sistema abierto, mientras que las Figuras 10.3 y 10.4 ofrecen sendos ejemplos de diferentes tipos de sistemas cerrados horizontales y verticales.

10.1.2 Panorama actual de la utilización de la energía geotérmica en el mundo

El *World Geothermal Congress 2010* celebrado en Bali en abril del presente año constituye la fuente de información más actualizada y completa acerca del grado de utilización de la energía geotérmica a nivel mundial. Se ofrece a continuación un resumen de los datos más importantes relativos a usos directos y generación de energía eléctrica extraídos de la citada fuente.

10.1.2.1 Usos directos

A finales del año 2009, el número de países que empleaban la energía geotérmica en la modalidad de usos directos era de **78**, con una capacidad instalada de **50.583 MWt**, cifra que representa un crecimiento del **78,9%** respecto al año 2005. La energía térmica utilizada fue de **121.696 GWh/año**, lo que significa un **60,2%** más que en 2005. La bomba de calor geotérmica representó el **49%** de los usos térmicos de esta energía y el **69,7%** de la capacidad instalada. (Figuras 10.5 y 10.6).

El crecimiento de la energía utilizada ha sido, en gran medida, consecuencia del aumento del número de instalaciones que emplean la bomba de calor geotérmica. Sólo en los últimos cinco años, la energía utilizada y la capacidad instalada correspondientes a estos dispositivos registraron sendos incrementos medios anuales del **19,7%** y del **18%**. De hecho, la generalización del uso de la bomba de calor geotérmica ha abierto la posibilidad de que esta energía pueda aprovecharse casi en cualquier lugar, tanto para calefacción como para refrigeración.

Los cinco países que cuentan, en términos absolutos, con la mayor capacidad instalada de energía geotérmica para usos directos son Estados Unidos, China, Suecia, Noruega y Alemania, con un **62,8%** de la capacidad mundial. En lo que respecta a la energía utilizada, las cinco primeras posiciones están ocupadas por China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Japón, en este caso con un **54,7%** del total mundial. España ocupa el puesto 31 en capacidad instalada (141 MWt) y el 38 en energía utilizada (684 TJ/año), si bien le corresponde la 4ª posición entre los países que registraron un mayor crecimiento de su potencia instalada –debido a la bomba de calor geotérmica– durante los últimos cinco años.

Figura 10.2. Diagramas de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua en sistema abierto

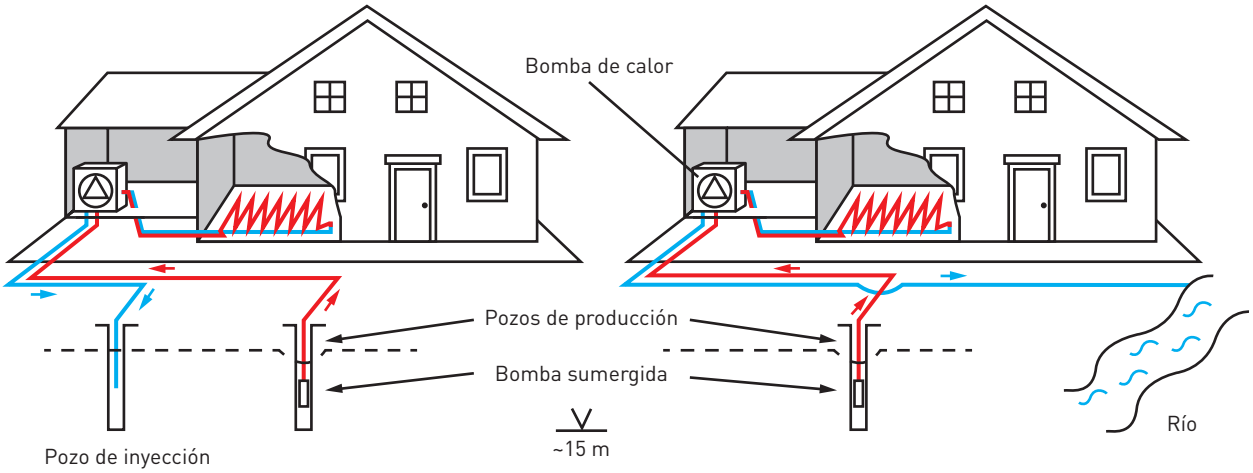


Figura 10.3. Sistemas cerrados con intercambiadores de calor horizontales

a. Intercambiador de calor horizontal

b. Intercambiador horizontal tipo bobina

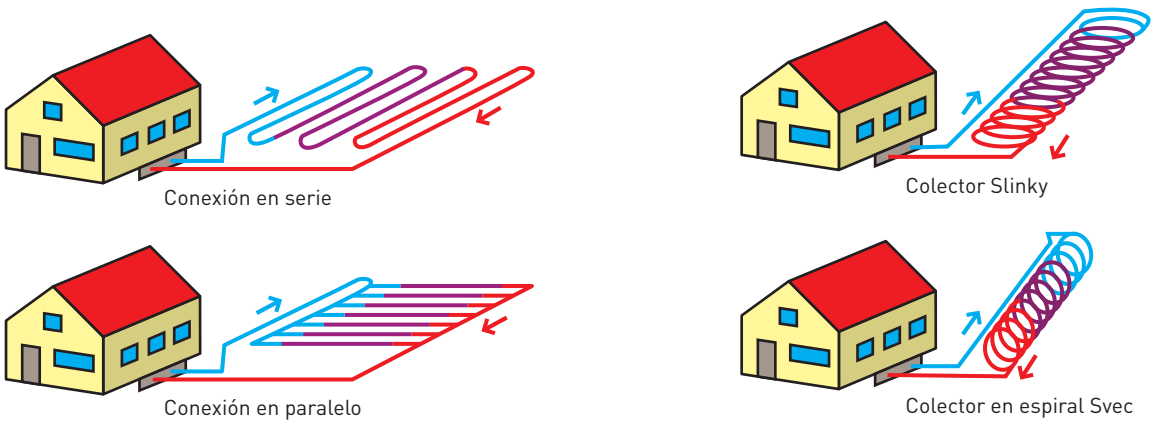
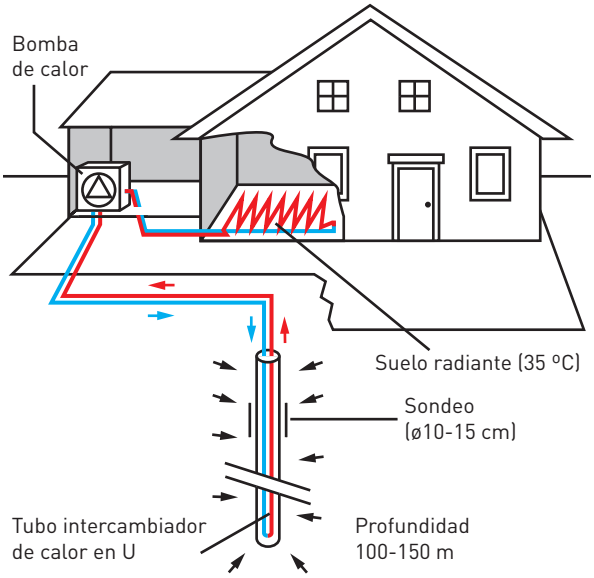


Figura 10.4. Sistemas cerrados con sondas geotérmicas y pilotes termoactivos

a. Sonda geotérmica vertical



b. Sistema de cimentaciones energéticas y detalle de un pilote termoactivo

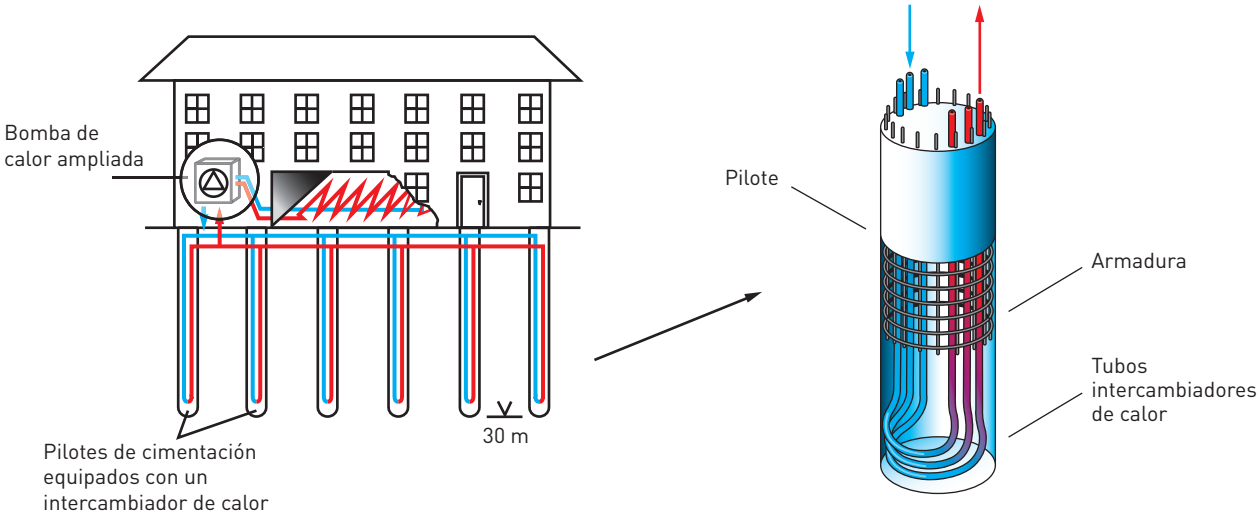


Figura 10.5. Energía geotérmica utilizada en usos directos en el mundo (final año 2009)

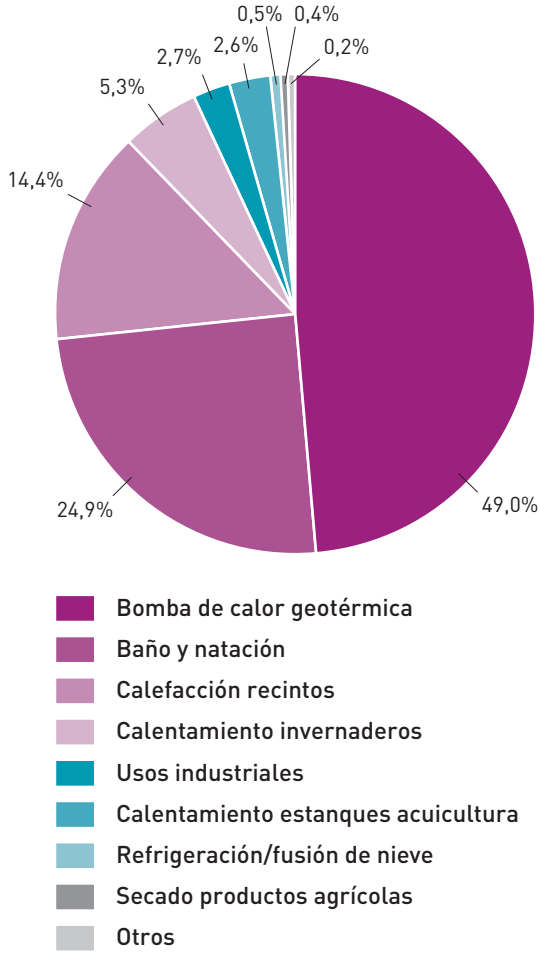
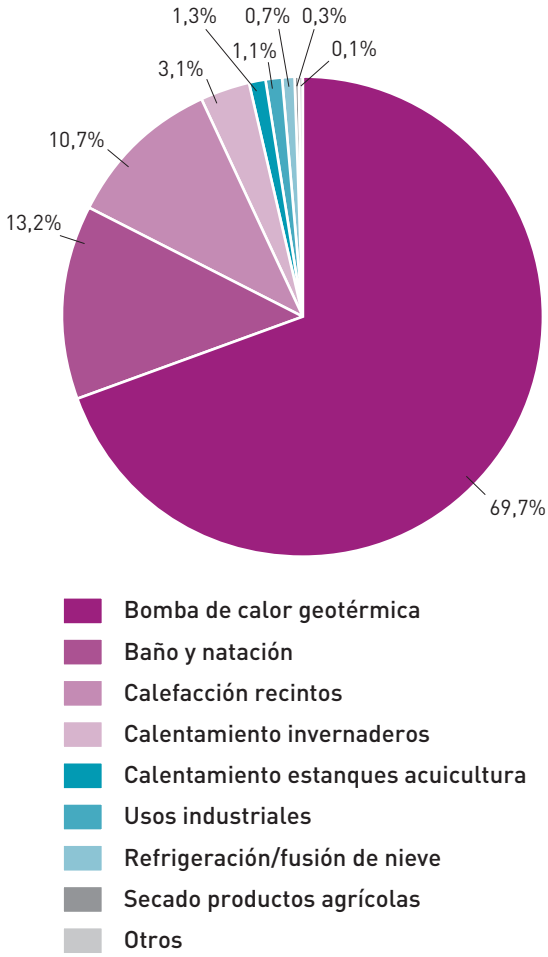


Figura 10.6. Capacidad instalada para usos directos (final año 2009)



10.1.2.2 Generación de energía eléctrica

La capacidad instalada de las plantas de producción de electricidad a partir de energía geotérmica estimada para el año 2010 asciende a **10.715 MWe**, lo que significa un aumento del **19,9%** (1.782 MWe) respecto al año 2005. La producción anual para la misma fecha es de **67.246 GWh**, un 20,7% más que en 2005. Atendiendo a los datos referidos a proyectos existentes que se encuentran en fase ejecutiva, se espera que en 2015 la potencia eléctrica instalada alcance los **18.500 MWe**, lo que supondría un fuerte incremento del **72,7%** (7.785 MWe).

Según se observa en la tabla 10.1, los cinco países con valores más elevados de capacidad y producción son, por este orden, Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México e Italia. Dos de ellos –Estados Unidos e Indonesia– figuran también entre los que

han experimentado un mayor incremento de capacidad instalada, en términos absolutos, durante el último quinquenio, junto con Islandia, Nueva Zelanda y Turquía.

Tabla 10.1. Relación de los cinco países con mayor capacidad eléctrica instalada en 2010

País	Año 2005		Año 2010	
	MWe	GWh	MWe	GWh
Estados Unidos	2.564	16.840	3.060	14.533
Filipinas	1.930	9.253	1.904	10.311
Indonesia	797	6.085	1.197	9.600
México	953	6.282	958	7.047
Italia	791	5.340	843	5.520

El número de centrales geotérmicas de generación de electricidad actualmente en operación asciende a **526**, distribuidas en **24 países**, con una capacidad media de **20,6 MW(e)** y. El 9,1% de las mismas supera los 55 MW(e), con una capacidad media de 79,5 MW(e), mientras que un 41,6% presenta potencias comprendidas entre 10 y 55 MW(e). El 49,2% restante presenta una capacidad media de 3,2 MW(e). Según refleja la tabla 10.2, las plantas de vapor seco se encuentran a la cabeza tanto en capacidad instalada como en producción eléctrica por unidad. Sin embargo, las de ciclo binario son las más numerosas, mientras que las de tipo flash son las que concentran el mayor valor de capacidad instalada.

Tabla 10.2. Distribución de plantas geotérmicas por tecnologías

Tipo	Nº unid.	Capacidad instalada		Prod. media (GWh/ unid.)
		Total (MWe)	Media (MWe/ unid.)	
Sin condensación*	25	145	6	96
Ciclo binario	236	1.178	5	27
Flash	141	4.421	31	199
Doble flash	61	2.092	34	236
Vapor seco	62	2.878	46	260

*Esta denominación se corresponde en inglés con la de tipo *Back Pressure*

Los cinco países con mayor capacidad instalada son **Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México e Italia**. Las tecnologías que concentran el mayor porcentaje de dicha capacidad son la de vapor seco en el caso de Estados Unidos e Italia, de tipo flash en Filipinas e Indonesia y de doble flash en México.

10.1.3 Inventario de aprovechamientos geotérmicos de muy baja y baja temperatura en España

El objetivo del presente inventario es disponer de una estimación, lo más ajustada a la realidad que la información disponible lo permita, del grado de aprovechamiento actual de los recursos geotérmicos de muy baja temperatura en España. El hecho de que no se disponga no existe actualmente de un inventario de instalaciones geotérmicas a escala nacional, ni tampoco a nivel autonómico, dificulta notablemente la valoración del uso actual de esta energía y la planificación de su desarrollo. Si bien algunas comunidades autónomas disponen de una relación de las instalaciones financiadas a través de subvenciones en su ámbito administrativo, se trata de información no accesible por hallarse amparada por la normativa en materia de protección de datos.

En tales circunstancias, se optó por llevar a cabo una serie de **consultas a las empresas del sector geotérmico**, mediante el envío por correo electrónico a un total de **58 empresas** de un sencillo cuestionario en el que solicitaban datos acerca del número, características y ubicación de las instalaciones realizadas por cada una de ellas. Sin embargo, apenas 22 (37,9%) de estas empresas enviaron una respuesta, de las que sólo 19 remitieron el cuestionario cumplimentado.

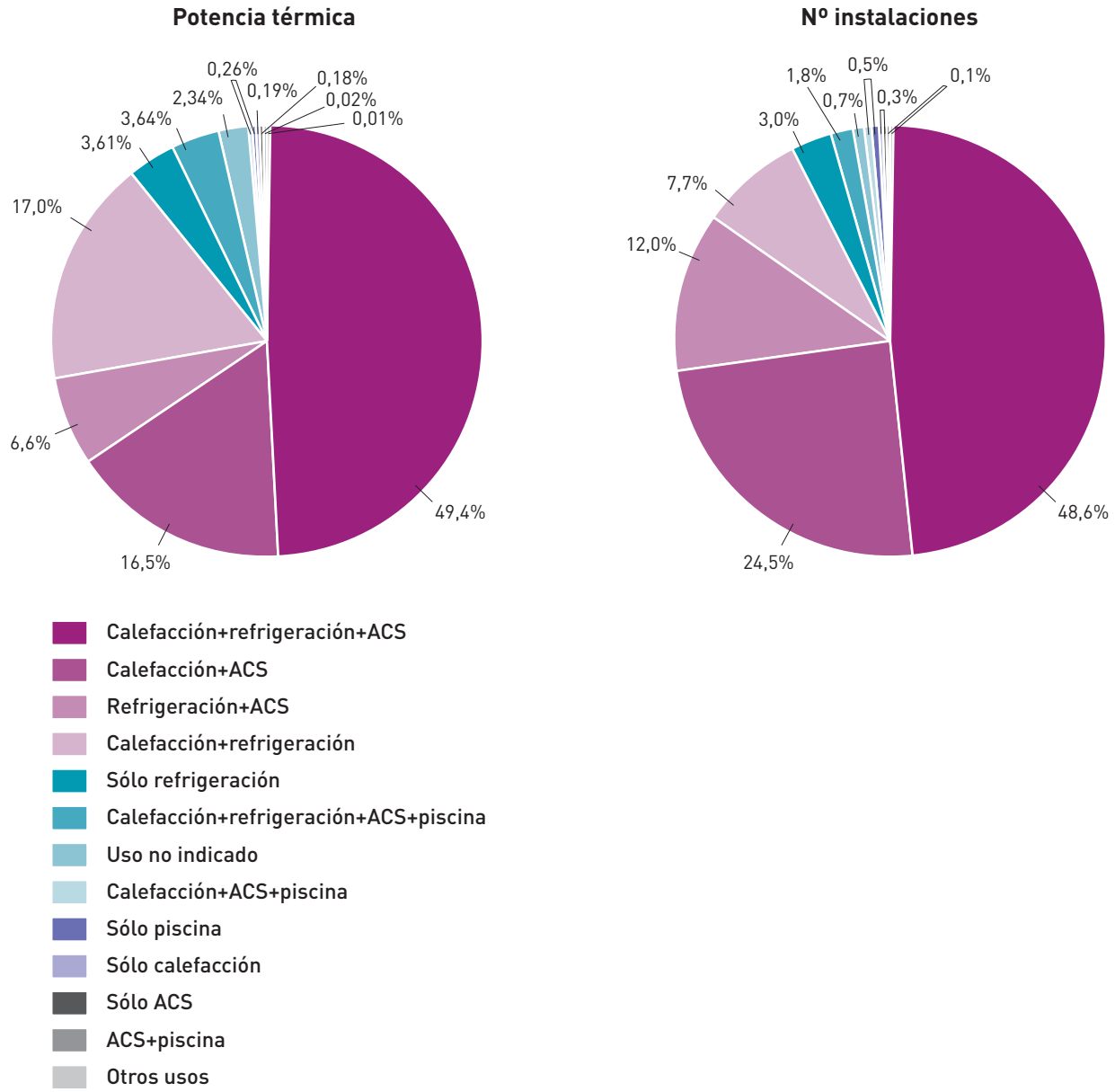
La tabla 10.3 ofrece una clasificación, por usos y potencias térmicas, de las instalaciones que figuran en dichos cuestionarios. Su número total asciende a **1.036**, de las que el **98,6%** (1.021) son de sistema cerrado y sólo el **1,4%** (15) de sistema abierto. La potencia térmica total de estas instalaciones es de **29.938,6 kW**, con un rango por instalación que oscila entre 2 y 1.200 kW, y un valor promedio de 29 kW. Según estos datos, las comunidades autónomas con mayor potencia instalada son, por este orden, **Cataluña (10.700,7 kW), Madrid (4.763,1 kW) y País Vasco (3.990,3 kW)**. La Figura 10.7 refleja de forma gráfica la distribución porcentual por usos del número de estas instalaciones y de su potencia térmica; en ambos casos las destinadas a calefacción + refrigeración + ACS alcanzan porcentajes próximos al 50%.

Tabla 10.3. Clasificación por usos del número y potencia de las instalaciones incluidas en los cuestionarios

Uso	Nº instalaciones	Potencia térmica (kW)
Sólo calefacción	3	57,0
Sólo refrigeración	31	1.082,0
Sólo ACS	3	52,8
Calefacción + refrigeración	80	5.101,5
Calefacción + ACS	254	4.944,5
Refrigeración + ACS	124	1.964,0
Calefacción + refrigeración + ACS	503	14.786,5
ACS + piscina	1	6,0
Calefacción + ACS + piscina	5	78,0
Calefacción + refrigeración + ACS + piscina	19	1.089,0
Sólo piscina	5	78,0
Otros usos	1	0,0
Uso no indicado	7	699,4
Total	**1.036**	**29.938,6**

Con el fin de completar la información obtenida a través del envío del cuestionario, se llevó a cabo una recopilación de diversos documentos de reciente publicación, en los que se describe de forma monográfica una serie de aprovechamientos geotérmicos realizados en España en los últimos años. El número total de instalaciones detectadas a través de la bibliografía asciende a 43, si bien la información de cada una de ellas no siempre es completa. Su incorporación al grupo de las inventariadas a través de los cuestionarios asciende a **1.079**, de las que el **97,5%** (1.052) son de sistema cerrado y el **2%** (22) de sistema abierto, mientras que en las 5 restantes (**0,5%**) se desconoce el tipo de sistema. La potencia instalada del conjunto asciende a **36.273,7 kW**, con un rango por instalación que oscila entre 2 y 4.000 kW, y un valor promedio de 34,3 kW.

Figura 10.7. Distribución por usos de la potencia térmica instalada y del número de instalaciones



El limitado número de respuestas al cuestionario sugiere que la capacidad y el número de estas instalaciones ha de ser, probablemente, muy superior al proporcionado por aquéllas. En efecto, según aparece reflejado en el apartado 8.5.1 de este Informe, la potencia térmica instalada para aplicaciones de bomba de calor geotérmica en el año 2010 se estima entre **70 y 100 MWt**.

Por último, en lo referente a aprovechamientos de aguas de baja temperatura, según los datos publicados en el año 2005 por Sánchez, J. y García de la Noceda, C., se tiene constancia de la existencia de **11** de tales aprovechamientos, con una capacidad total de **22,3 MWt** y una energía anual utilizada de **347,2 TJ/año.**

10.2 POTENCIAL DE RECURSOS GEOTÉRMICOS EN ESPAÑA. DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN

El trabajo de análisis y síntesis de la documentación existente, llevado a cabo en el presente proyecto, ha permitido evaluar el potencial de recursos geotérmicos de España. Esta evaluación se ha realizado clasificando los recursos, como es habitual, por su rango térmico. Se han establecido seis tipos de recursos:

- Recursos de muy baja temperatura contenidos en las rocas del subsuelo (T < 30 ºC).
- Recursos de muy baja temperatura contenidos en los acuíferos (T < 30 ºC).
- Recursos de baja temperatura en formaciones geológicas profundas (30 ºC < T < 100 ºC).
- Recursos de media temperatura (100 ºC < T< 150 ºC).
- Recursos de alta temperatura (T > 150 ºC).
- Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS).

Recursos de muy baja temperatura contenidos en las rocas del subsuelo

La geología del suelo y subsuelo español pone de relieve un predominio de la existencia de rocas con capacidad de cesión de calor elevada. Los mapas de potencia térmica elaborados a partir del mapa litológico de España, mediante la asignación de cada tipo de roca de un valor de dicho parámetro, indican un importante potencial de este recurso. Grandes áreas de territorio español están ocupadas por rocas de tipo carbonatado, metamórfico o ígneo, que son las que más capacidad de cesión de calor tienen para su aprovechamiento con bomba de calor –Andalucía, Asturias, Cantabria, Cataluña, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana, Extremadura, Galicia, Navarra entre otros– tienen un elevado porcentaje de su superficie ocupado por este tipo de roca.

Recursos de muy baja temperatura contenidos en los acuíferos

Una revisión pormenorizada de la hidrogeología española ha permitido recopilar datos básicos para la utilización de la energía contenida en las aguas subterráneas que circulan por acuíferos del subsuelo. Profundidad, temperatura, caudal y calidad del agua han sido recogidos, cuando existían en la documentación consultada. La estabilidad de la temperatura de las aguas subterráneas en España, con un rango de variación generalizado de 10-20 ºC, en función de la localización de los acuíferos, permite utilizarlos como fuente de energía en instalaciones de bomba de calor para climatización. A este respecto es importante señalar que una gran mayoría de las capitales de provincias se sitúan sobre los terrenos aluviales de los ríos. Estos materiales aluviales constituyen buenos acuíferos y reúnen condiciones apropiadas para su utilización con bomba de calor.

Recursos de baja temperatura contenidos en formaciones geológicas profundas

Para el análisis de este tipo de recursos se ha clasificado el subsuelo español en dos grandes grupos: grandes cuencas sedimentarias por una parte y cordilleras periféricas y Macizo Hercínico por otra. En el primer grupo se han incluido las cuencas del Duero, Tajo-Mancha-Júcar, Guadalquivir, Ebro y Norte-Cantábrica. En el segundo se han incluido las Cordilleras Béticas, Pirineos y Costeros Catalanas y el Macizo Hercínico del oeste de la Península Ibérica.

Dentro de las áreas incluidas en el primer grupo, se presenta en el subsuelo un elevado número de formaciones permeables pertenecientes a los materiales de los periodos Mesozoico y Terciario que rellenan dichas cuencas. La energía geotérmica en forma de calor almacenado recuperable (reservas geotérmicas) en dichas formaciones se ha estimado en un total de 15.126 x 10^5 GWh. Aplicado el cálculo a las zonas de influencia de núcleos urbanos importantes con potenciales consumidores de la misma, la cifra alcanza los 150,3 x 10^5 GWh, aproximadamente el 1% del total.

Las áreas incluidas en el segundo grupo, estudiadas en detalle por el IGME desde 1975, se caracterizan por una fracturación regional importante que junto a un gran desarrollo vertical de formaciones permeables permiten la proliferación de zonas con recursos geotérmicos. La energía geotérmica en forma de calor almacenado recuperable (reservas geotérmicas) de estas zonas se ha estimado en 736 x 10^5 GWh. Aplicando el cálculo a las áreas de influencia de núcleos urbanos importantes, con potenciales consumidores, la cifra alcanza los 9,6 x 10^5 GWh, el 1,3% del total de estas áreas.

En resumen, la energía geotérmica de baja temperatura en forma de calor almacenado recuperable,

en el subsuelo de España se ha estimado en un total de 15.862 x 10^5 GWh, de los que 159,9 x 10^5 GWh se encuentran en el entorno de áreas con potenciales consumidores de esta energía para uso directo de calor.

Recursos de media temperatura

La gran profundidad que caracteriza algunas cuencas geológicas españolas en las que es habitual la presencia de formaciones permeables a más de 3.500 metros, permite la existencia de recursos geotérmicos de media temperatura, utilizables mediante ciclos binarios para la producción de calor. A la citada profundidad, el agua contenida en las formaciones permeables tiene una temperatura que supera los 100 ºC, gracias al gradiente geotérmico del subsuelo. En otras zonas es la ya citada importante fracturación regional, la que facilita la circulación profunda de los fluidos geotérmicos. Así, áreas de la cuenca Cantábrica, Prepirineo, Tajo, Guadalquivir y Cordilleras Béticas presentan formaciones permeables muy profundas con fluidos a más de 100 ºC. En Cataluña y en el Macizo Hercínico (principalmente Galicia), la fracturación regional favorece la presencia de estos yacimientos. Los estudios realizados por el IGME, así como las investigaciones de hidrocarburos realizadas por compañías petrolíferas, han permitido reconocer o estimar áreas concretas de existencia de estos recursos, como las depresiones de La Selva y Vallés en Cataluña, zona de Jaca-Serrablo en Aragón, zona norte de la Cuenca de Madrid, zona de Lebrija en la Cuenca del Guadalquivir, depresiones internas de las Cordilleras Béticas como Lanjarón en Granada o Sierra Alhamilla en Almería, y finalmente áreas dispersas en Galicia, Salamanca y Cáceres.

El potencial bruto de los recursos en forma de calor almacenado recuperable en las áreas no reconocidas se eleva a 541 x 10^5 GWh, equivalentes a una potencia instalada de 17.000 MW(e).

Los recursos geotérmicos en forma de calor almacenado recuperable de las zonas reconocidas o estudiadas mencionadas se ha estimado en 54,23 x 10^5 GWh, lo que teniendo en cuenta todos los factores de rendimiento, renovabilidad y carga de funcionamiento permitirían instalar hasta 1.695 MW(e) en plantas de ciclo binario.

Recursos de alta temperatura

Las condiciones para la existencia de recursos geotérmicos de alta temperatura ligados a fenómenos magmáticos, la geotermia de alta entalpía convencional, solo se dan en España en las Islas Canarias. Las investigaciones llevadas a cabo en el pasado por el IGME y por otras entidades, han puesto de relieve la probabilidad de existencia de yacimientos de vapor o mezcla de agua y vapor en varias áreas de Tenerife –NW, E y S de la isla–. En otras islas (Lanzarote y La Palma) existen manifestaciones térmicas superficiales muy importantes que, sin embargo, no tienen reflejo en la existencia de posibles almacenes de fluido geotérmico.

En Tenerife, en las tres zonas citadas, se ha estimado que existen yacimientos a profundidad que pueden variar de 2.500 a 3.500 metros y temperaturas en el rango de 200-220 ºC. La energía geotérmica en forma de calor almacenado recuperable en dicha zona se ha estimado en 1,82 x 10^5 GWh, lo que teniendo en cuenta rendimientos, renovabilidad y carga de utilización, podrá permitir la instalación de 227 MW(e) en plantas de tipo flash convencionales.

Recursos de Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS)

Los criterios básicos utilizados para la selección de áreas donde desarrollar sistemas EGS se pueden sintetizar en los siguientes puntos: 1. existencia de una masa de roca dura, granítica o metamórfica, con baja permeabilidad en su matriz; 2. existencia de una fracturación regional importante que afecte a dicha masa, y 3. existencia de cierto grado de anomalía geotérmica.

A la vista de estos criterios, una revisión pormenorizada de la geología peninsular ha permitido la selección de una serie de áreas con posibilidades geológicas para la implantación de estos sistemas geotérmicos estimulados. Las áreas consideradas son: fosas tectónicas de La Selva y Vallés en Cataluña, Áreas de fracturación profunda en Galicia, fosa tectónica del SW de Salamanca –Ciudad Rodrigo y Tormes– que afectan al sustrato hercínico, zonas fracturadas del oeste de Cáceres, bordes de la depresión del Tajo caracterizado por fracturas de gran envergadura y que afectan al sustrato hercínico, y , finalmente, áreas de Andalucía en donde el sustrato granítico o paleozoico se encuentra muy fracturado como Sierra Morena o la zona más interna de las Cordilleras Béticas en el entorno de Sierra Nevada.

La energía geotérmica que se podría encontrar en forma de calor almacenado recuperable en estas áreas ha sido estimada en 60 x 10^5 GWh, lo que podría permitir, teniendo en cuenta los ya mencionados factores de rendimiento, renovabilidad y carga de utilización, instalar una potencia total de 745 MW(e).

Resumen

En el siguiente cuadro se presenta un resumen de los recursos geotérmicos evaluados en España.

Cuadro del potencial de recursos geotérmicos profundos en España

Tipos de uso	Tipos de yacimientos[1]	Calor almacenado recuperable (10^5 GW.h)	Potencia equivalente (MW)
Usos térmicos	Baja temperatura (bruta)	15.862	5.710.320 (t)
	Baja temperatura (en zonas con consumidores)	159,9	57.563 (t)
Usos eléctricos	Media temperatura (potencial bruto)	541	17.000 (e)
	Media temperatura (reconocido o estudiado)	54,23	1.695 (e)
	Alta temperatura (reconocido o estudiado)	1,82	227 (e)
	Sistemas Geotérmicos Estimulados (en áreas conocidas)	60	745 (e)

[1]No se incluyen los recursos geotérmicos someros, ciclos cerrados o ciclos abiertos, por la dificultad de cuantificación

10.3 ANÁLISIS DEL MARCO JURÍDICO-ADMINISTRATIVO DE REFERENCIA EN MATERIA DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Se ha llevado a cabo una amplia recopilación de las normas que, en mayor o menor medida, conforman el marco jurídico de referencia de la energía geotérmica, así como un examen del contenido y alcance de las más importantes, acompañado de una descripción sucinta de los procedimientos administrativos actuales más comunes necesarios para llevar a término los principales tipos de aprovechamientos geotérmicos. Ambos aspectos –jurídico y administrativo– han sido objeto de un análisis crítico, con el fin de poner de manifiesto los principales obstáculos a los que se enfrenta actualmente el desarrollo de proyectos geotérmicos y proponer, en consecuencia, medidas que eliminen estas barreras y favorezcan el desarrollo del potencial geotérmico español.

La norma europea de referencia más importante en el ámbito de la geotermia y de las demás energías renovables es la *Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE*. En ella se establecen nuevos objetivos globales nacionales en relación con la cuota de energía procedente de fuentes de energía renovables en el consumo final bruto de energía en 2020. El asignado a España es del **20%**, valor similar al objetivo global establecido para el conjunto de la Unión Europea.

Entre otras cuestiones, esta nueva directiva dispone que cada Estado miembro deberá adoptar un **Plan de Acción Nacional en Materia de Energía Renovable (PANER)**, en el cual se determinarán los objetivos nacionales en relación con las cuotas de energía procedentes de fuentes renovables consumidas en el transporte, la electricidad y la producción de calor y frío en 2020, y se definirán las medidas propuestas para alcanzar tales objetivos. En el capítulo concreto de la geotermia cabe destacar, entre otras novedades, la de que la energía

capturada por las bombas de calor se incluya en el cálculo del consumo final bruto de energía procedente de fuentes renovables para calefacción y refrigeración, siempre, naturalmente, que la producción final de energía supere de forma significativa el insumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor.

En el ámbito jurídico nacional, la cuestión más relevante es, sin lugar a dudas, la consideración de la energía geotérmica como **recurso minero** y su correspondiente inclusión en la legislación minera. En concreto, los recursos geotérmicos se asignan a la **sección D**), definida en la Ley 54/1980, de 5 de noviembre, de modificación de la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Tal definición no ha experimentado modificación alguna pese a haber transcurrido ya 30 años desde la promulgación de la citada ley. Ello significa que, al día de hoy, tales recursos se encuentran sujetos a la legislación minera y a su régimen de autorizaciones –permiso de exploración, permiso de investigación y concesión de explotación–, incluyéndose en los mismos los de tipo convencional, roca caliente seca o sistemas estimulados e, incluso, los someros de muy baja temperatura, si bien en este último caso existe la posibilidad de excluirlos del ámbito de esta ley bajo determinadas circunstancias.

El artículo 149.25 de la Constitución Española establece que el Estado tiene competencia exclusiva sobre las bases del régimen minero y energético. No obstante, corresponde a las comunidades autónomas, en el marco de la legislación básica del Estado y en los términos recogidos en sus respectivos estatutos, el desarrollo legislativo, la potestad reglamentaria y la ejecución en esta materia, lo que significa que el órgano sustantivo a estos efectos debe pertenecer a dichas Administraciones. Hasta la fecha Galicia es la única comunidad autónoma que dispone de legislación propia en materia de minería, concretamente la denominada *Ley 3/2008, de 23 de mayo, de ordenación de la minería de Galicia*, si bien en lo que a la definición de recurso geotérmico se refiere no aporta novedades respecto a la normativa nacional.

Además de estar sujetos a la legislación minera, dependiendo del tipo de aprovechamiento geotérmico puede ser necesaria la elaboración de un estudio de impacto ambiental, en cuyo caso el promotor ha de atenerse a la norma que le corresponda en función de la ubicación del proyecto, dado que existen tantas como comunidades autónomas –de diferente contenido y alcance–, además de una ley de evaluación de impacto de ámbito nacional. Asimismo, cuando el sistema sea de tipo abierto, se deberá solicitar a la confederación hidrográfica o al organismo autonómico competente según corresponda, una concesión o bien una autorización de aprovechamiento del agua subterránea así como una autorización de vertido. A estos trámites hay que añadir los correspondientes a Industria para la legalización de la instalación de superficie, y los permisos y licencias municipales pertinentes.

Este complejo entramado administrativo puede llegar a convertirse en un serio obstáculo para el desarrollo de proyectos geotérmicos, entre otras razones porque impone unos plazos tan dilatados que, en ocasiones, pueden llevar al promotor al desistimiento. Resulta, pues, imprescindible proceder a una profunda reflexión acerca de las causas que originan esta situación, con objeto de identificar los puntos críticos y analizar las posibles alternativas para, en último término, crear un escenario favorable al desarrollo de la energía geotérmica en España, en el que las limitaciones principales no sean otras que las del propio recurso natural y no las impuestas por la maquinaria administrativa. En el apartado siguiente de este Informe se recoge una propuesta de alternativas dirigidas en este sentido.

10.4 PROPUESTA PARA EL FOMENTO Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

10.4.1 Propuesta de desarrollo a corto plazo de aprovechamientos geotérmicos

Considerando el potencial de recursos evaluados expuesto anteriormente y las condiciones de existencia de mercado se ha realizado una propuesta de desarrollo de proyectos geotérmicos que llevaría a alcanzar en 2020 las siguientes potencias instaladas:

- Bomba de calor geotérmica (geotermia somera): 247-1379 MWt (según el escenario de evolución que se considere).
- Proyectos de geotermia profunda de baja temperatura: 277 MWt (recursos y demandas suficientemente conocidos).
- Proyectos de producción de electricidad en un escenario conservador (proyectos iniciados, en fase exploratoria):
  - Alta entalpía convencional: 50 MW(e).
  - Media entalpía (ciclos binarios): 18,95 MW(e).
  - EGS: 13,3 MW(e).

10.4.2 Recomendaciones de orden jurídico-administrativo

Como se ha comentado anteriormente, los recursos geotérmicos se encuentran incluidos en la Sección D) de la Ley de Minas, lo que significa que la investigación y el aprovechamiento de los mismos están sujetos a la legislación minera, la cual tiene carácter nacional salvo en el caso de Galicia, que dispone de la suya propia. Por otra parte, dependiendo del tipo de aprovechamiento, puede ser necesaria la elaboración de un estudio de impacto ambiental, en cuyo caso el promotor ha de atenerse a la norma que le corresponda en función de la ubicación, dado que existen tantas normas como comunidades autónomas, además de una ley de evaluación de impacto de ámbito nacional. Asimismo, cuando el sistema sea de tipo abierto, se deberá solicitar a la confederación hidrográfica o al organismo autonómico competente, según corresponda, una concesión o bien una autorización de aprovechamiento del agua subterránea así como una autorización de vertido. A estos trámites hay que añadir los correspondientes a Industria para la legalización de la instalación de superficie, y los permisos y licencias municipales pertinentes.

Este complejo entramado administrativo puede llegar a convertirse en un serio obstáculo para el desarrollo de proyectos geotérmicos, entre otras razones porque impone unos plazos tan dilatados que, en ocasiones, pueden forzar a la renuncia hasta al promotor más entusiasta. Resulta, pues, imprescindible proceder a una profunda reflexión acerca de las causas que originan esta situación, con objeto de identificar los puntos críticos y analizar las posibles alternativas para, en último término, crear un escenario favorable al desarrollo de la energía geotérmica en España, en el que las limitaciones principales no sean otras que las del propio recurso natural y no las impuestas por la maquinaria administrativa.

Entre las recomendaciones que, en el marco del presente estudio, pueden realizarse de cara a la supresión de barreras al desarrollo geotérmico, se proponen las siguientes:

- Redefinición del recurso geotérmico en la legislación minera, orientada a establecer una clara diferencia entre dos categorías: los de origen somero de baja o muy baja temperatura y los profundos, de manera que los primeros puedan acogerse a un sistema de permisos y concesiones distinto a los de la sección D), más ágil y sencillo. Asimismo, dicha diferenciación debería dejar abierta la posibilidad de compatibilizar ambas categorías en una misma zona. En lo referente a los recursos de origen somero, sería conveniente que en su definición se estableciese un umbral de profundidad para los sondeos de captación –250 metros sería un valor adecuado– y, además, se incluyeran las aguas subterráneas destinadas exclusivamente a usos térmicos y no consuntivos procedentes tanto de sondeos como de labores mineras y drenajes de obras civiles. También convendría reconsiderar la superficie mínima a otorgar a las autorizaciones de este tipo de recursos, dado que las que recoge actualmente la legislación resultan excesivas –la mínima es de aproximadamente 30 ha–, especialmente en el caso de aprovechamientos situados en áreas urbanas.
- La legislación minera debería contemplar la posibilidad de que se produzcan interferencias entre las aguas termales (sección B) y los recursos geotérmicos (sección D), en particular los de origen somero, actualmente sujetos a un régimen distinto de autorizaciones, de manera que, en virtud de esta consideración, se establezca un sistema que, aún perteneciendo a una u otra categoría, otorgue protección a un aprovechamiento existente respecto a otro nuevo que pudiera llegar a comprometerlo.
- Puesto que la legislación minera vigente es, salvo en el caso de Galicia, de aplicación a todo el territorio nacional, convendría establecer un procedimiento unificado de tramitación en todas las CC AA, en el que la autoridad minera constituiría el órgano sustantivo, lo que redundaría en una reducción de los plazos que conlleva actualmente

dicha tramitación, y permitiría, además, disponer de un inventario actualizado de aprovechamientos geotérmicos.

- Sólo 3 de las 17 normas autonómicas de evaluación de impacto ambiental establecen un umbral específico de profundidad para las perforaciones geotérmicas –tampoco lo hace la ley nacional–, en virtud del cual se determina el alcance del trámite que ha de realizarse para obtener el oportuno visto bueno por parte de la autoridad ambiental. Se trata de una cuestión de importancia excepcional en la medida en que los plazos de tramitación para las captaciones situadas por debajo del límite pueden llegar a resultar considerablemente menores que los de aquéllos que lo superen. En tales circunstancias, la incorporación a la ley nacional de evaluación de impacto de un umbral de profundidad, que permitiese excluir del trámite más complejo a las perforaciones geotérmicas que no lo superasen, constituiría una importante referencia para que las CC AA hiciesen lo propio en sus respectivas normas.
- Los sistemas geotérmicos abiertos podrían tener una consideración especial en lo referente al régimen de concesiones, en la medida en que devuelven al acuífero el agua extraída una vez realizado el aprovechamiento térmico y, por tanto, no alteran el balance hídrico. Actualmente, los aprovechamientos de caudal inferior a 7.000 m^3/año sólo precisan de autorización –salvo en acuíferos sobreexplotados o sujetos a especial protección–, cuya tramitación es mucho más corta y sencilla que la de una concesión, reservada para caudales superiores al citado. Dicho límite podría ampliarse, en el caso específico de los sistemas geotérmicos abiertos, hasta una cifra más ajustada al consumo de estas instalaciones, siempre, naturalmente, que exista el compromiso de reinyectar en el mismo acuífero la totalidad del agua extraída.

10.4.3 Medidas de orden económico-financiero

- En las instalaciones actuales de edificios con climatización centralizada (calderas, bomba de calor, red de distribución, etc.), el coste de estos elementos se encuentra incluido en el precio de edificios, viviendas, oficinas, etc., y goza de este modo de una financiación a largo plazo a través de la hipoteca constituida al efecto. Se propone que expertos en los aspectos jurídico-financieros estudien la posibilidad de que las instalaciones geotérmicas necesarias para el desarrollo de un proyecto de aprovechamiento de similares características, pueden quedar también englobadas en el coste unitario del edificio, vivienda, etc., de modo que su financiación se realice de una forma similar a la que tiene lugar con las instalaciones necesarias para el aprovechamiento de energías fósiles. Una financiación de este tipo facilitaría la viabilidad económica de los proyectos geotérmicos.
- Continuar con los programas de incentivos y ayudas al desarrollo de proyectos de aprovechamiento de energía geotérmica, actualmente en marcha por parte del IDAE y CC AA, dando una mayor difusión y publicidad a los mismos. Para ello sería útil, aunque sea repetitivo, presentarlos en todas las jornadas, seminarios, congresos, cursos, etc., que tengan lugar.
- Contemplar los programas de investigación de recursos geotérmicos incluidos en los **Permisos de Exploración e Investigación**, en las líneas de ayudas a la investigación de recursos minerales del subsuelo para mitigar el riesgo minero, que tienen establecidos el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y las CC AA, salvando las actuales dificultades de incluir la geotermia debido a su carácter de recurso energético. La energía geotérmica a diferencia del carbón, que cuenta con ayudas muy consolidadas por parte del Estado Español y de la Unión Europea, no dispone actualmente de este tipo de ayudas.
- Establecer una línea de proyectos de demostración apoyados económicamente por los gobiernos central y autonómicos, que abarque diferentes tipos de desarrollos: calefacción de distrito, geotermia convencional, geotermia muy profunda, EGS, etc.
- A título de ejemplo, estos dos últimos apartados se podrían concretar en un programa de 3-4 proyectos en fase de investigación y 3 a 4 proyectos en fase de demostración, en los que participaran financieramente las Administraciones central y autonómicas, lo que permitiría el despegue del aprovechamiento de los recursos geotérmicos profundos en España.

10.4.4 Medidas de difusión

Uno de los mayores déficit de la energía geotérmica respecto de otras tecnologías renovables es la falta de conocimiento por parte de promotores y consumidores. A este respecto, se recomienda dar una

mayor difusión a los conocimientos actuales sobre potencial geotérmico, posibilidades de utilización, diversidad de tecnologías, proyectos europeos de referencia, etc., a través de todas las vías posibles:

- Web de IDAE y de Agencias de la Energía de las CC AA.
- Folletos de divulgación.
- Organización de jornadas para la difusión entre profesionales y público en general.

10.4.5 Medidas para la mejora del conocimiento de los recursos

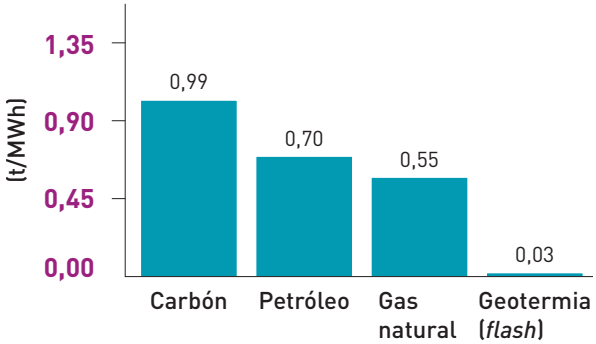
Llevar a cabo por las Administraciones central y autonómica los estudios e investigaciones encaminados a la mejora del conocimiento geotérmico del subsuelo: puesta al día de datos de geología profunda generados por la prospección de hidrocarburos en los últimos 20 años, investigación de nuevos datos de flujo de calor en áreas de ausencia actual de información, estudios geológicos y tectónicos que permitan seleccionar áreas de EGS, etc. Dentro de este tipo de acciones se debería encuadrar las encaminadas a la confirmación del potencial bruto de recursos de media temperatura propuesto en este informe.

10.5 BENEFICIOS AMBIENTALES

La geotermia constituye una energía renovable capaz de sustituir a los combustibles fósiles tanto en aplicaciones de uso directo del calor, como en la generación de energía eléctrica. En ambos casos, tales aplicaciones conllevan una importante **reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero** respecto a las que se generarían mediante los citados combustibles.

La ausencia de procesos de combustión en las centrales eléctricas abastecidas con energía geotérmica supone un considerable ahorro de emisiones, y si bien los yacimientos geotérmicos llevan asociada una emisión de CO_2 de origen natural, ésta es mucho menor que la generada por los combustibles fósiles. Las emisiones asociadas a las centrales geotérmicas de ciclo binario se aproximan a cero, mientras que las procedentes de las plantas *flash* que emplean vapor a alta temperatura varían ampliamente según las características del recurso aunque, según se ha indicado, se encuentran siempre muy por debajo de las producidas por los combustibles fósiles, tal como evidencia la Figura 10.8.

Figura 10.8. Emisiones de CO_2 asociadas a la producción de electricidad empleando diferentes tecnologías



Fuente: Departamento de la Energía de Estados Unidos

En el caso de los recursos geotérmicos de baja temperatura, las emisiones naturales son notablemente inferiores a las de los yacimientos de alta, siendo en muchos casos prácticamente nulas. Las asociadas a la explotación para usos directos de recursos de baja temperatura localizados en yacimientos profundos, se limitan básicamente a las derivadas del consumo eléctrico de los equipos de bombeo.

En lo referente a la bomba de calor –geotermia somera–, las emisiones dependerán, entre otros factores, de la eficiencia energética del equipo, expresada mediante el coeficiente COP (*Coeficient of Performance*) definido como el cociente entre la energía útil –calorífica o de refrigeración– obtenida de la bomba y la energía consumida por esta última. Las emisiones asociadas a este consumo variarán en función del valor del *mix* eléctrico del que provenga esta energía, al igual que las de los sistemas de bombeo y demás equipos que conforman la instalación. No obstante, se trata de valores mucho más favorables que los de los combustibles fósiles. La tabla 10.4 ofrece un resumen de los coeficientes de emisión asociados a los diferentes tipos de aprovechamientos geotérmicos.

Tabla 10.4. Factores de emisión de CO_2 asociados al aprovechamiento de recursos geotérmicos de alta y baja temperatura y de otras fuentes de energía

Fuente de energía			Factor de emisión (t CO_2/MWh)	
Carbón			0,99[a]	0,96[c]
Petróleo			0,70[b]	0,89[c]
Gas natural			0,55[a]	0,60[c]
Geotérmica	Recursos alta temperatura	Plantas *flash* (USA)	0,03 - 0,04[d]	
		Todas las plantas (USA)	0,09[e]	
		Todas las plantas (11 países)	0,12[f]	
	Recursos baja temperatura		0 - 0,001[g]	

Fuentes:
[a]Platt's Research and Consulting. Calculados a partir de datos de EPA's Continuous Monitoring System (2003)
[b]EPA Clean Energy Impacts (2005)
[c]Bloomfield et al. (2003). Calculados a partir de datos de DOE´s Energy Information Administration
[d]DOE (2000)
[e]Bloomfield et al. (2003)
[f]Bertani and Thain (2002)
[g]IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources - Proceedings. Lübeck, Germany (2008)

Con el fin de valorar el beneficio que, desde esta perspectiva, supone el uso de la energía geotérmica frente a otras de origen fósil, se ha realizado el cálculo de emisiones correspondiente a los diferentes escenarios de desarrollo del potencial geotérmico en España incluidos en el capítulo 8 de esta Memoria, y se han comparado sus resultados con las emisiones asociadas a la producción de cantidades similares de energía mediante el uso de gasóleo y gas natural, en el caso de las aplicaciones de muy baja y baja temperatura (bomba de calor), y de carbón, petróleo y gas natural, en el de las centrales de generación de electricidad.

Las estimaciones realizadas indican que las instalaciones de bomba de calor geotérmica generan 2,8 veces menos emisiones que las que emplean gas natural, y 3,8 veces menos que las de gasóleo. En el caso de las que explotan recursos geotérmicos profundos de baja temperatura serían incluso inferiores, en concreto casi 12 y 16 veces más bajas que las generadas con uno y otro tipo de combustible.

En el caso de la producción de electricidad mediante ciclos binarios (recursos convencionales y EGS) y tecnología *flash*, los cálculos realizados para las propuestas de desarrollo geotérmico con estas tecnologías en España recogidos en la tabla 10.5 evidencian la superioridad de la geotermia frente a las energías de origen fósil, desde el punto de vista de las emisiones causadas.

Tabla 10.5. Emisiones comparadas para las tecnologías de ciclo binario y tipo flash en España

Tecnología	Emisiones por tipo de energía (t CO_2/año)			
	Geotermia	Gas natural	Petróleo	Carbón
Yacimiento de media temperatura (ciclo binario)	1.489.083	7.311.154	10.899.601	11.656.348
Yacimiento de alta temperatura (tipo *flash*)	63.610	1.088.647	1.622.974	1.735.655
EGS (ciclo binario)	743.712	3.651.504	5.443.728	5.821.680

www.idae.es

IDAE: Calle Madera 8, 28004, Madrid, Tel.: 91 456 49 00, Fax: 91 523 04 14
mail: comunicacion@idae.es

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO
IDAE