

Muestreo de las características geotérmicas de la Comunidad Gallega

El proyecto que se ha llevado a cabo es un muestreo de las características térmicas del subsuelo como son la conductividad térmica, el flujo geotérmico, la difusividad, etc, realizado *in situ* a lo largo de la geografía gallega, así como en la experiencia adquirida a lo largo de estos años por INGEO. El objetivo principal del proyecto ha sido obtener una información válida, real y fiable del subsuelo de modo que el dimensionado de las instalaciones de captación geotérmica se base, no solo en datos bibliográficos, sino también en datos empíricos de cada zona.

En los últimos años, la Comunidad de Galicia ha sido una de las pioneras tanto en instalaciones de *energía geotérmica* como en empresas que trabajan en el sector. La gran mayoría de los sistemas implantados utilizan sondeos verticales con intercambiadores de calor geotérmicos que, a través de una bomba de calor geotérmica, dan servicio de climatización a edificios de distinto uso (residencial, oficinas, etc.).

Sobre el cálculo, diseño y ejecución de estas instalaciones geotérmicas se pueden encontrar numerosas soluciones para adaptar la tecnología existente a los requerimientos de cada una de ellas. Sin embargo, no ocurre lo mismo en cuanto a las características y necesidades de captación. Los recursos de muy baja temperatura se encuentran bajo cualquier tipo de terreno, pero es necesario un conocimiento detallado de éste para poder realizar el dimensionado de manera correcta. Hasta el momento los datos que se han venido utilizando son tomados de bibliografía tanto europea como americana, pero no se encuentran valores característicos de la zona.

Los objetivos del proyecto llevado a cabo en Galicia ha sido los de obtener una información válida, real y fiable del subsuelo de modo que el dimensionado de las instalaciones de captación geotérmica se base, no solo en datos bibliográficos, sino también en datos empíricos de cada zona. Finalmente, una vez obtenidos los valores característicos, se han integrado dentro de un *Sistema de Información Geográfica* con el fin presentar dichos datos de manera georeferenciada y permitir consultas, el análisis de la información, la edición de datos, mapas, etc.

Introducción

La situación energética actual de dependencia absoluta de los combustibles fósiles provoca la búsqueda de alternativas que supongan una reducción de contaminantes y por lo tanto una mayor sostenibilidad ambiental. Así, se

propone como una de las soluciones más eficaces el empleo de fuentes de energía renovables que sustituyan a los sistemas convencionales, disminuyendo de este modo el impacto ambiental.

Dentro de las diferentes soluciones energéticas renovables, la energía geotérmica de muy baja temperatura, destaca dentro de ellas por su disponibilidad y por su aprovechamiento en el mismo lugar en el que se genera, condicionado por las características geológicas principalmente, pero también por las geográficas, climatológicas y de uso de la energía térmica que ha de aportar el terreno.

En particular, las características litológicas del subsuelo de Galicia la colocan como una de las zonas más propicias para el aprovechamiento de estos recursos geotérmicos, como una solución energética posible y muy viable, tanto técnica como económicamente.

Para el aprovechamiento eficiente del recurso geotérmico de muy baja temperatura es fundamental conocer de la forma más precisa posible las condiciones térmicas del lugar, tanto ambientales como del subsuelo, así como la definición del uso o del aporte energético que va a realizar ese terreno.

Hasta el momento, las únicas referencias que se tenía para definir el campo de captación geotérmico eran las de normas y guías europeas o americanas, o datos generales de la litología de la zona publicados, por ejemplo, por el *Instituto Geológico y Minero de España*. Este estudio se desarrolla con el objeto de proporcionar un conjunto de datos reales y específicos relacionados con la capacidad geotérmica del subsuelo gallego, partiendo de datos teóricos y contrastándolos con datos empíricos obtenidos a lo largo de cinco años de trabajo en campo y en gabinete, con el fin de aportar una primera aproximación a la parte más desconocida en el diseño de este tipo de instalaciones, que además representa una parte primordial para su correcto dimensionado y funcionamiento.

Palabras clave: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, DIFUSIVIDAD TÉRMICA, FLUJO GEOTÉRMICO, TEMPERATURA SUPERFICIAL, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.



Alfredo FERNÁNDEZ (*) y
Lucia NOVELLE (*)

(*) INGEO Investigación Geotérmica.

CONTENIDO DE LOS MAPAS

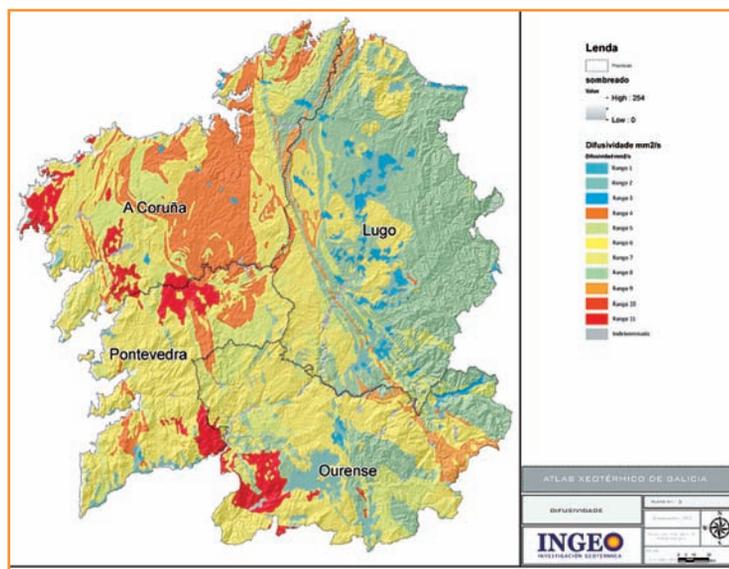
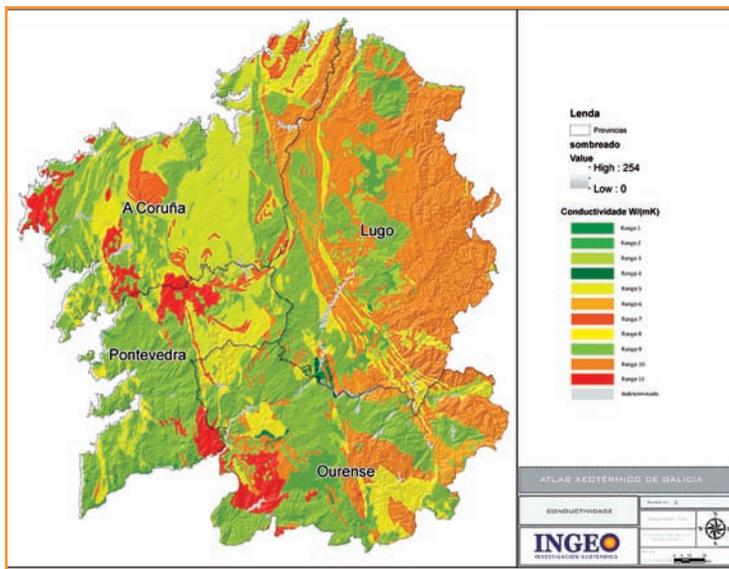
El Atlas contiene una serie de mapas con información de parámetros útiles para la caracterización del subsuelo y evaluación del aprovechamiento del recurso geotérmico de baja entalpía en Galicia. La orientación pretendida en la información mostrada tiene un marcado carácter cualitativo, sin embargo, con el objeto de un uso cuantitativo se han elaborado los mapas digitales, formatos *shp* y *ráster*, para su empleo en sistemas de información geográfica.

Los productos ofrecidos en este Atlas se exponen a continuación:

- **Mapa Geológico.** Obtenido a partir de la información del IGME, *Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias* a escala 1:1.000.000, el cual se publicó, en su última edición, en el año 1.994. Este tipo de mapa, que sintetiza el conocimiento geológico, se inició en el año 1879 y se realizaron hasta la fecha diez versiones. La digitalización, procedente del análisis de las hojas MAGNA, Orozco M., Pérez F., González M. y Martín S. (2009) a escalas 1:25.000 y 1:50.000, se inició en el año 1.991 y para eso se siguieron las normativas desmenuadas para la cartografía geológica de la misma serie.

Se deben mencionar que en el Atlas Geotérmico se han realizado las oportunas modificaciones para adaptarla a las singularidades de este tipo de mapa con discrepancias en la paleta de colores y valores CMYK. Este mapa, sin aportar nada nuevo, es la base junto con el modelo digital del terreno para el desarrollo de la cartografía específica.

- **Mapa de Conductividad Térmica (Fig. 1).** Obtenido a partir de datos del proyecto: *Investigación Geofísica y Geotérmica de Baja Entalpía en el área de Galicia, 2.007-2.010*, donde se ha medido el valor de la conductividad térmica *in situ*. La conductividad térmica, definida como el parámetro que gobierna la velocidad de transferencia de calor por conducción en un cuerpo determinado debido a un diferencial de temperatura, Gehlin (2002).



■ [Figura 1] .- Mapa de conductividad térmica del subsuelo gallego.

■ [Figura 2].- Mapa de difusividad térmica del subsuelo gallego.

Esto no solo indica la capacidad que una roca o material geológico posee para transmitir calor en régimen estacionario, Carslaw y Jaeger (1959) sino la influencia solidaria en la rentabilidad y viabilidad económica sobre los costes de implantación de un sistema geotérmico de baja entalpía.

- **Mapa de Difusividad Térmica (Fig. 2).** Obtenido a partir de las mediciones realizadas en el proyecto "Investigación Geofísica y Geotérmica de Baja Entalpía en el área de Galicia, 2.007-2.010". La difusividad térmica, α , es un parámetro importante que describe la capacidad de transporte de calor por conducción en condiciones transitorias. Si en el subsuelo un material geológico se calienta, su temperatura aumenta hasta un punto en función de su capacidad calorífica volumétrica, que depende de su densidad y de su calor específico, que es la cantidad de energía que se necesita para aumentar una cierta temperatura la masa de una roca y su contenido en agua.

Además, se debe tener en cuenta la proporción de roca y agua como factores determinantes para el almacenamiento de energía térmica en el subsuelo, Hellström (2000), puesto que el calor específico de un volumen de suelo aumenta con el contenido de agua, Chiasson, Rees y Spittler (2000).

- **Mapa de Flujo Geotérmico.** Generado a partir del mapa de conductividad térmica implementado con el gradiente geotérmico, que se define, este último, como la variación de temperatura (ΔT^z) en función de una profundidad determinada. La diferencia de temperatura que existe entre el interior de la tierra y el exterior provoca una transferencia de energía térmica que se denomina *flujo geotérmico*, Ericsson (1985). De esta forma, se puede ver la contribución del flujo geotérmico en el conjunto del balance térmico del subsuelo

y su variación en función de la profundidad, VDI 4640 (2000).

- **Mapa de Temperaturas superficiales a cota de altitud 0 (Fig 3).** Realizado a partir de datos de las estaciones meteorológicas ambientales ofrecidos por *MeteoGalicia* y por la *Agencia Española de Meteorología*. Se ha consultado información sobre valores medios de las series de datos climatológicas recogidos de una selección de observatorios a lo largo de toda la geografía gallega, así como informes elaborados por *MeteoGalicia* que recogen los datos de las principales ciudades gallegas comparados con los valores climáticos del período 1973-2003. Además, para poder trabajar con valores tomados de diferentes estaciones, es decir, a diferentes cotas, se han referenciado todos ellos a una misma base.

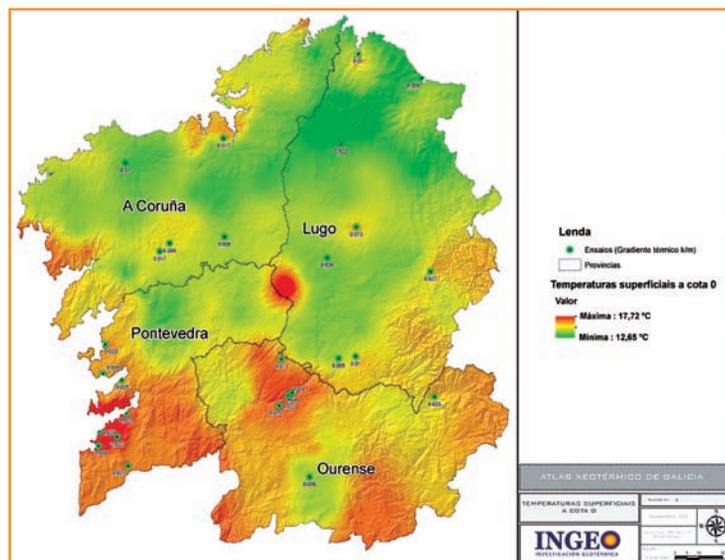
METODOLOGÍA

Para realizar los mapas ha sido necesario llevar a cabo una *Recopilación* de información biblio-

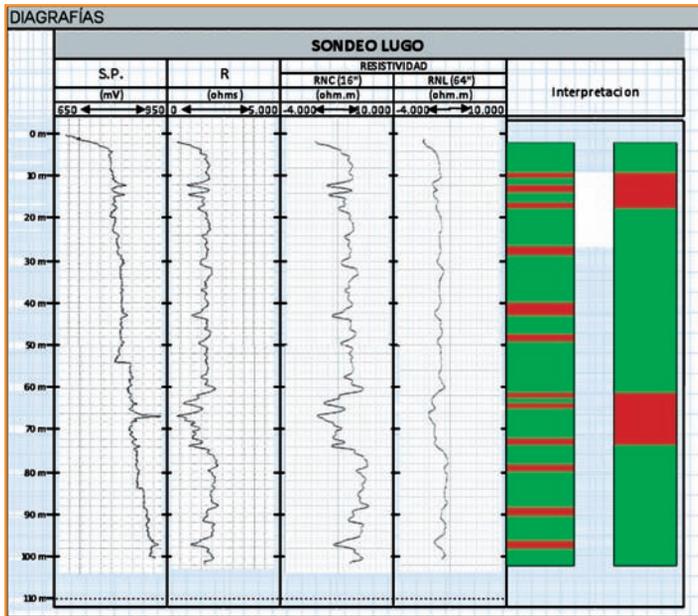
gráfica para el estudio litológico y un muestreo para la obtención de datos empíricos.

A partir del estudio de la geología de Galicia se han establecido límites de los principales dominios, aunque no se definen formalmente *unidades litoestratigráficas* en cada uno de ellos, se ha considerado que, en general tienen un rango equivalente al de formación y en algunos casos al de miembro. Se sintetizan las unidades establecidas en cada uno de los *Dominios*, así como la litología y la edad de los materiales. Como se ha mencionado, estas unidades no están formalmente definidas, pero en general se ha asumido una posición equivalente a la formación y participación en algunos casos.

Con la información obtenida sobre las litologías más representativas del subsuelo de Galicia se establece un muestreo donde realizan sondeos *ad hoc* y se aprovechan otros existentes y que se basan fundamentalmente en criterios estructurales, litológicos en cuanto al punto de vista geológico y de potencial uso y creci-



■ [Figura 3].- Mapa de temperatura superficial de Galicia.



■ [Figura 4] .- Diagrama de resistividad geofísica.

miento en el ámbito de la construcción desde el punto de vista de núcleos poblacionales.

La validación (Fig. 4), se ha realizado con las medidas procedentes de la testificación geofísica con medidas de *Gamma Natural (GN)*, *Potencial espontáneo (PE)*, *Resistencia en un punto (SPR)*, *Resistividad normal, larga (RNL)* y *corta (RNC)* y sus correcciones según *Guyod*, *Schlumberger* y *Gearhart-Owen*, realizada en el muestreo y el levantamiento de columnas litológicas.

La determinación de la conductividad térmica del subsuelo de forma clásica se realiza por dos métodos:

1. *Muestreo de suelo* sin injerencia, perforación con recuperación de testigo; de esta manera todas y cada una de las unidades litológicas tienen que ser muestreadas y su contenido natural en agua medido y evaluado (Foto 1).
2. *Test de respuesta geotérmica*, este ensayo se realiza *in situ* sobre el intercambiador vertical instalado en el sondeo (Foto 2).

De los métodos propuestos, la complejidad y el coste que supone la necesidad de recuperación de testigo del primer método, en toda la longitud del sondeo, hace que en la práctica casi no se utilice.

En el *Atlas Geotérmico* se han utilizado los dos métodos pero sin duda alguna, por razones económicas y técnicas, el *Test de Respuesta Geotérmica* destaca como instrumento que aporta de forma rápida y precisa una determinación de los parámetros geotérmicos del suelo, según la experiencia adquirida por el equipo técnico del proyecto, que coincide con trabajos anteriores de *Choudary* (1976); *Mogensen* (1983); *Claesson et al.*, (1985); *Claesson* y *Eskilson* (1988); *Hellström* (1991).

El *Test de Respuesta Geotérmica* ha sido desarrollado y testado satisfactoriamente en la *University of Technology* en Luleå, Suecia, en la mitad de la década de los 90 por *Eklöf* y *Gehlin* (1996). Similar desarrollo realizado por *Austin* (1998) se produce sobre la misma época, desde los Estados Unidos (*Oklahoma State University, Stillwater OK*). Un tanto diferente fue el enfoque dado por *Van Gelder et al.* (1999) en Holanda con el enfriamiento del subsuelo por medio de la bomba de calor.

La principal ventaja del *Test de Respuesta Geotérmica* es la grabación *in situ* de la temperatura sobre la longitud total de la perforación y también la inclusión exacta de las condiciones del terreno sin injerencia, el relleno del sondeo y el posible flujo de agua subterránea. En el diseño de instalaciones geotérmicas de tamaño medio, éste puede ser optimizado y apoyado con los datos aportados por el ensayo de respuesta según *Sanner et al.* (1999).

Para la evaluación de los ensayos de respuesta térmica se ha utilizado la teoría de la *línea de la fuente*, teoría aplicada en los años cuarenta para el cálculo de sistemas geotérmicos, para grabar los cambios de temperatura en el terreno en función del tiempo, *Ingersoll* y *Plass* (1948) y *q.v. Sanner*, (1992).

Los datos así obtenidos se han validado con las medidas y calibraciones realizadas por el *Laboratorio Oficial de Metrología de Galicia (L.O.M.G.)*, acreditado por *ENAC*.

Para la determinación de la difusividad térmica no se ha seguido el modelo clásico si no



■ [Foto 1] .- Equipo de testificación geofísica.



■ [Foto 2] .- Equipo de ensayo de respuesta geotérmica.

que se ha obtenido la capacidad calórica volumétrica mediante medición *in situ*, con un flujo de calor en un supuesto régimen estacionario debido a la inyección de calor durante un periodo de tiempo prolongado, donde la influencia de la capacidad calórica volumétrica se obtiene en el desarrollo de un régimen transitorio *Ghelin* (1998) y *Kavanaugh et al.* (2000).

La validación de este método se ha realizado mediante el uso de un modelo numérico, programa *FEFLOW*, simulando la curva para ajustar los valores de conductividad y calor específico para una coincidencia con los valores obtenidos en las mediciones en el régimen transitorio de la curva.

La teoría de la *fuentes lineal* se emplea también para modelizar el efecto del agua subterránea en sondeos verticales asumiendo el caso particular de que el movimiento natural de agua subterránea sea razonablemente homogéneo en un subsuelo con material poroso en el volumen de suelo a considerar, *Eskilson* (1988), *Claesson* y *Hellström* (2000) y *Chiasson et al.* (2000).

La realización de perfiles de temperatura con un análisis cualitativo y cuantitativo en el proceso de enfriamiento natural antes y después de los ensayos de respuesta, se encuadra

dra en el marco de la metodología empleada para la determinación del gradiente de temperatura para la obtención del flujo geotérmico.

Para poder elaborar un mapa de temperaturas superficiales se han tomado series de datos de 65 estaciones meteorológicas de *MeteoGalicia* y de la *Agencia Española de Meteorología* durante un mínimo de cinco años. Se han calculado los valores medios de temperatura de cada una de ellas a lo largo de todo el año y se han corregido éstos teniendo en cuenta la diferencia de cota entre estaciones, con el fin de anular las variaciones de temperatura debidas al enfriamiento adiabático del aire en función de la altitud.

De este modo, aplicando un gradiente de temperaturas constante de 4,6°C/km y rectificando los datos medidos en las estaciones meteorológicas, se pueden interpolar los valores de temperatura de estaciones próximas a pesar de que éstas se encuentren a distintas altitudes, según una base común a cota cero, de manera que, conocida la cota de la zona de estudio, se pueda obtener el valor de temperatura superficial correspondiente.

CONCLUSIONES

De este estudio se desprende que a pesar de la gran variedad de rocas que afloran en el suelo gallego, son dos los tipos predominantes: *rocas ígneas* y *rocas metamórficas*. El resto queda subordinado a la extensión y abundancia, a excepción de alguna cuenca sedimentaria.

De todos los parámetros geofísicos analizados se concluye que la *resistividad* y la *radiación gamma* son los más resolutivos a la hora de discriminar litologías. Además, se ha concluido que el *registro del potencial espontáneo* es más representativo de la conductividad del agua que de las litologías.

Definido el comportamiento que experimentan los registros frente a las distintas litologías y a sus características y establecidos los mejores registros para la identificación y caracterización de las mismas, se puede afirmar que con la testificación geofísica en sondeos se pueden caracterizar desde un punto de vista cualitativo las diferentes litologías con las siguientes limitaciones:

- Los valores obtenidos de resistividad real varían muy poco de unas litologías a otras.
- En el caso de los valores de emisividad real los valores obtenidos son más determinantes.

Desde el punto de vista de la testificación geotérmica, la ejecución de ensayos de respuesta térmica, y la interpretación de datos generados mediante la Teoría de la *fuerza lineal* como principio de la evaluación del subsuelo, se ratifica invariablemente como uno de los métodos más apropiados para la determinación de los parámetros geotérmicos,

por la fiabilidad y precisión mostrada en los resultados obtenidos en las mediciones.

A la vista de los resultados, se puede concluir que existe la posibilidad de extrapolar la caracterización térmica del subsuelo a litologías semejantes de otras zonas, pero esta extrapolación de la parametrización geofísica y geotérmica a zonas estudiadas indica que tiene fuertes limitaciones. Los resultados indican que la relación entre los valores de parámetros geotérmicos obtenidos y las naturalezas litológicas atravesadas, muestran una heterogeneidad tal que prever o estimar parámetros geotérmicos a partir de litologías semejantes no confluye hacia un valor unívoco sino más bien en un rango o una orden de magnitud válida para tener un punto de partida en un cálculo previo que sea preciso para la toma de decisiones. Sin embargo, no se puede tomar como valor para un cálculo final específico de una obra determinada. Esto es debido a la cantidad de variables que intervienen en el subsuelo y que modifican con su influencia los valores de la parametrización geotérmica.

Por lo tanto, de cara a estudios preliminares en intervenciones geotérmicas localizados en un área determinada, pueden utilizarse dichos mapas para conocer los parámetros del subsuelo, pero, con el fin de optimizar las perforaciones e instalaciones geotérmicas y dada la diversidad y complejidad geológica de Galicia, es recomendable realizar la testificación de al menos un sondeo con el fin de parametrizar las condiciones litológicas y térmicas reales del lugar.

En cuanto al método de testificación del sondeo, se ha comprobado que la complejidad técnica del muestreo a través de la recuperación de testigo, debido a las profundidades de trabajo para sondeos de captación geotérmica y a la dificultad en la evaluación del contenido de agua en el estado natural del terreno, sin injerencia, lo hacen casi inviable para este tipo de estudios. Sin embargo, el uso del *Test de Respuesta* permite obtener de manera precisa y relativamente rápida, los parámetros geotérmicos del subsuelo analizado.

Sobre la influencia del agua subterránea en el rendimiento de los intercambiadores de calor, las mediciones realizadas en el muestreo de campo, indican que los movimientos del agua subterránea generan un transporte convectivo de calor que hace variar cuantitativamente el rendimiento efectivo del sondeo, apoyando a lo publicado por *Gehlin* a finales de la década de los 90 del siglo pasado y lo postulado unos años más tarde por *Sanner, Chiasson, Helgesen y Witte*, en esta materia. Se llega a la conclusión de que la presencia de agua subterránea solo tiene un efecto significativo en el rendimiento del sondeo, en cuanto al flujo se refiere, en las rocas con permeabilidad secun-

daria debida a fisuras y fracturas tanto de origen mecánica como de disolución y por supuesto a geologías o materiales geológicos con alta porosidad intergranular o primaria, como es el caso de arenas y gravas.

En el sistema de información geográfica elaborado por el equipo se plasma gran parte de la labor de integración de todo el trabajo desarrollado durante el proyecto de investigación a través de un proceso científico-técnico de asociación, codificación e implementación de información y conocimiento. Cinco cartografías son el resultado del sistema de información geográfica, a saber, geológica, de conductividad térmica, de difusividad geotérmica, de flujo de calor y de temperaturas superficiales a cota cero de todo el territorio gallego presentados en tres formatos, un impreso, un digital estático y un visor *on-line* interactivo. La consecución de los mapas geotérmicos del territorio gallego mediante la parametrización del subsuelo de Galicia servirá de ayuda en la toma de decisiones, eso sí, deberán tomarse con cierta prudencia y a nivel de anteproyecto debido a la heterogeneidad geológica que a nivel regional presentan los suelos gallegos.

Todo esto no habría sido posible sin la importante aportación del equipo técnico de *INGEO*, el *Dpto. de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Universidad de Vigo*, los integrantes del equipo investigador del *Dpto. de Temperatura del Laboratorio Oficial de Metrología de Galicia*, los técnicos, operarios, y demás personal de las empresas de perforación que hicieron posible las mediciones y por supuesto la *Xunta de Galicia*, a través del *Programa Sectorial de Investigación Aplicada para Recursos Energéticos y Mineros*.

Bibliografía

- ESKILSON, P. & CLAESSON, J. (1988). *Simulation Model for thermally interacting heat extraction boreholes*. *Numerical Heat Transfer* 13, S. 149-165.
- FERNANDEZ, A., NOVELLE, L. *Proyecto I+D+i "Investigación Geofísica y Geotérmica de Baja Entalpía en el área de Galicia"*, dentro del programa "Proyectos de Investigación de Empresas Privadas o Agrupaciones de Empresas de Carácter Privado. Recursos Energéticos" del *IN.CI.TE.* (2007- 2010).
- SANNER, B., HELLSTRÖM, G., SPITLER, J. & GEHLIN, S. (2005). *Thermal Response Test – current status and world-wide application*. – *Proc. WGC 2005, paper No. 1436, CD-ROM, IGA, Reykjavik*.
- SANNER, B., REUSS, M. & MANDS, E. (1999). *Thermal Response Test - eine Methode zur In-Situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden*. – *Geothermische Energie* 24-25/99, S. 29-33, Geeste.



INGEO - Investigación Geotérmica
Parque Tecnológico de Galicia
32901 San Ciprián de Viñas (Orense)
☎: 988 368 193 • Fax: 988 368 149.
E-mail: ingeo@ingeo.es
Web: www.ingeo.es