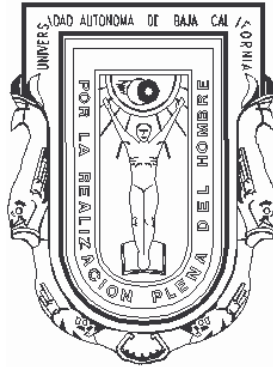


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

Maestría en Ciencias e Ingeniería



**Estudio de Viabilidad del Sistema de Bombas de Calor con
Pozos Geotérmicos en el NW de España**

Tesis para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

PRESENTA

José Ángel Cid Fernández

DIRECTOR: Dr. Jaime A. Reyes López

***CODIRECTORES: Dr. Jorge Ramírez Hernández
Prof. Pedro A. Araujo Nespereira
Facultad de Ciencias – Ourense
Universidad de Vigo. Galicia, España***

Mexicali, Baja California

Enero de 2008

INDICE

RESUMEN.....	6
1.- INTRODUCCIÓN.....	8
1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2.- JUSTIFICACIÓN.....	12
1.3.- HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	13
1.4.- OBJETIVOS.....	15
2.- ANTECEDENTES.....	16
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	16
2.2 COMPONENTES DE UNA SOLUCIÓN GEOTÉRMICA.....	22
2.2.1 Cargas térmicas del espacio a climatizar.....	23
2.2.2 Subsistema bomba de calor	24
2.2.3 Subsistema Distribución interior de calor/frío.....	28
2.2.4 Subsistema Pozos de Intercambio Geotérmico	29
2.3 EFICACIA DE LOS SISTEMAS DE BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICAS	33
3.- METODOLOGÍA.....	35
4.- RESULTADOS	43
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	43
4.2 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	44
4.3 GEOLOGÍA Y TECTÓNICA	45
4.4 TERMOMETRÍA DEL SUELO A 50 CM DE PROFUNDIDAD	50
4.5 CONCENTRACIÓN DE CO ₂ EN EL SUBSUELO.....	53
4.6 CONCENTRACIÓN DE Rn ²²² EN EL SUBSUELO	55
4.7 SONDEO DE PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA.....	57
4.8 EVOLUCIÓN TÉRMICA E HIDROLÓGICA DEL SONDEO DE PROSPECCIÓN...	60
4.9 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN GEOTÉRMICA.....	62
5.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	68
6.- CONCLUSIONES	71
7.- BIBLIOGRAFÍA.....	73
8.- PLANOS.....	75
9.- ANEXO I ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN	76

INDICE DE FIGURAS

Fig 1.- Comparación del uso de energía 1995, 2000 y 2005	21
Fig 2.-Porcentaje de energía según uso	21
Fig 3.-Distribución por porcentaje del total de capacidad instalada	22
Fig 4.- Distribución espacial de la energía emitida por el Sol	23
Fig 5.- Elementos de un sistema de climatización geotérmico	24
Fig 6.- Esquema de funcionamiento de una BC de compresión mecánica.....	25
Fig 7.- Esquema de funcionamiento de una BC de compresión mecánica reversible.....	26
Fig 9.- Subsistema Bomba de Calor (BC)	28
Fig 10.- Variación estacional de la temperatura del subsuelo en función de la profundidad	30
Fig 11.- Variación de la temperatura en profundidad respecto a la temperatura media del pozo	30
Fig 12.- Esquema de un sistema de bucle abierto	31
Fig 13.- Bucle vertical	32
Fig 14.- Tubería PE alta densidad doble U en pozo de intercambio geotérmico.	32
Fig 15.- Diagrama de Sankey. Modificado de Monasterio et al (1993)	34
Fig. 16.- Comparación de los costes de energía de diferentes sistemas de calefacción ..	34
Fig. 17.- Diferentes configuraciones de la tubería de intercambio en el subsuelo	36
Fig. 18.- Modelo sinusoidal para la determinación de TES.....	38
Fig. 19.- Porcentaje de funcionamiento en modo calefacción	41
Fig. 20.- Nivel superior y vertientes en Ourense	46
Fig. 21.- Aspecto que presentan las Granodioritas en zonas próximas al área de estudio	47
Fig. 22.- Tercer nivel de Terrazas correspondiente al Campus de Ourense.....	48
Fig. 23.- Tercer nivel de terrazas con basculamiento hacia el NE	50
Fig. 24.- Equipo móvil para la medición de CO2 en el suelo	53
Fig. 25.- Toma de medidas en campo (Junio 2007)	54
Fig. 26.- Perforación del sondeo de investigación en el Campus de Ourense (Septiembre 2007)	58
Fig. 27.- Columna estratigráfica del sondeo de investigación en el Campus de Ourense.	59
Fig. 28.- Evolución de temperaturas de los primeros 25 m de pozo	60
Fig. 29.- Evolución del nivel freático.....	61
Fig. 30.- Temperatura cada 3 metros del pozo de investigación	61

Fig. 31.- Gradiente geotérmico del Campus de Ourense 62

AGRADECIMIENTOS

Viajar para descubrir y aprender nuevas tecnologías fuera de tu país de origen es una aventura arriesgada. En mi caso, esta etapa contó con la ayuda inestimable de personas e instituciones que facilitaron en sobremanera esta labor.

Deseo

Agradecer a la **Agencia Española de Cooperación Internacional** su apoyo económico sin el que nunca sería posible completar estos dos años de Maestría.

Agradecer a los **Dr. Reyes y Ramírez** y la **Dra. López** su asesoramiento docente, profesional y personal.

Agradecer al **Instituto de Ingeniería**, y a la **UABC** las facilidades y hospitalidad con la que me trataron desde el primer día que llegué a Mexicali.

Agradecer a la **Universidad de Vigo** su apuesta por la geotermia de baja temperatura y la confianza que depositaron desde el primer momento en mi grupo de investigación.

Agradecer a **Doña Elvira y Doña Alicia** la preocupación que siempre tuvieron por que me sintiera como en casa, a pesar de estar a 15000 km de ella.

Agradecer a los **compañeros** del Instituto de Ingeniería y **amigos** de Mexicali su cercanía y comprensión.

Agradecer a **Pedro y Mejuto** todos los fuegos que han apagado.

Dedicar este trabajo a mi **familia**, a los que están y ya no están.

RESUMEN

España importa el 85% de la energía total que consume. Esta dependencia respecto a productores exteriores se manifiesta también en toda la Unión Europea, lo que provoca inestabilidades económicas en los diferentes estados derivadas de las crisis de precios de los combustibles fósiles.

España, al igual que el resto de los países que firmaron el Protocolo de Kyoto, se propone como objetivo reducir en un 10% el consumo de combustibles fósiles antes del año 2010. Y esta reducción pasa por disminuir los consumos energéticos en climatización (43% del total) implementando diferentes líneas de actuación: a) Aumentar la eficiencia energética de las construcciones, mediante normativas que obliguen a un mejor aislamiento de las edificaciones y optimizar el diseño bioclimático de las mismas; b) Campañas de concienciación que aumenten la sensibilidad de la población respecto al consumo energético; y c) Promover la investigación, desarrollo e implementación de sistemas de climatización basados en energías renovables.

Las energías renovables son uno de los sectores de mayor crecimiento tecnológico en los últimos diez años en Europa. Cada comunidad apuesta por desarrollos concretos en los campos de la energía solar (térmica y fotovoltaica), eólica, bio-carburantes, biomasa, mareomotriz y geotérmica, que evitan el consumo anual de toneladas de petróleo y la emisión de miles de kilogramos dióxido de carbono a la atmósfera.

La energía geotérmica de baja temperatura está obteniendo excelentes resultados en países del centro y Norte de Europa. Combinando bombas de calor reversibles

(frío/calor) con un foco que mantiene una temperatura estable a lo largo del año (el subsuelo) es posible multiplicar la eficacia de un sistema (las bombas de calor) ya de por sí de los más eficientes entre los utilizados para la climatización de espacios.

Se trata de una tecnología joven (15 años de experiencia), cuyo crecimiento se cifra en valores del 30% anual en Europa pero cuyo desarrollo en España es aún muy limitado. Son necesarias experiencias reales y próximas que muestren a la sociedad en general las bondades del sistema, y su fiabilidad a lo largo del tiempo en diferentes condiciones climatológicas, y diferentes lugares.

La presente Tesis de Maestría en Ingeniería, pretende ser un elemento más que sume conocimiento acerca de la energía geotérmica de baja temperatura en nuestro país. La colaboración entre la Universidad Autónoma de Baja California (México) y la Universidad de Vigo (España) ha permitido desarrollar el presente estudio de climatización geotérmica en terrenos del Campus Sur y comparar su viabilidad económica con respecto a sistemas convencionales de climatización.

El compromiso de ambas instituciones con un desarrollo racional y sostenible ha provocado que la Universidad de Vigo se plantee el uso de este sistema de climatización en diferentes edificaciones de sus Campus, sustituyendo sistemas convencionales que consumen combustibles fósiles.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La situación geográfica de Europa determina su dependencia de instalaciones y fuentes de energía que proporcionen el calor suficiente para poder desarrollar de manera normal la vida humana. Durante el último siglo, esta necesidad se ha cubierto en más de un 90% mediante la utilización de fuentes de energía convencionales (calderas de gasoil, gas natural, electricidad o leña) provocando una dependencia extrema respecto a una única fuente de energía.

Los precios actuales del petróleo, con subidas de más de un 80% del precio del barril Brent durante el último año, está sobrepresionando la economía de las familias europeas, provocando por otro lado la mayor apertura del mercado a otros sistemas que, aunque resulten más caros inicialmente, no dependen tanto de una materia prima con un precio tan volátil. Dicho de otra manera, el alza de los precios de carburante ha permitido flexibilizar la mentalidad del consumidor respecto al sistema ideal para cubrir sus necesidades de calefacción.

La Energía Geotérmica es el contraste térmico del interior de la Tierra. Este calor se puede transformar en electricidad (campos de alta y media temperatura) o realizar aplicaciones directas en calentamiento de espacios, invernaderos, acuicultura, balneología (campos de baja temperatura).

El aprovechamiento de los yacimientos geotérmicos de baja temperatura se realiza actualmente de 2 maneras diferentes:

a) Con extracción de fluido

a.1) Con presencia de anomalía geotérmica

Mediante la explotación directa de aguas subterráneas con temperaturas entre los 30 y los 150°C.

a.2) Con gradiente geotérmico normal

Bombas de calor con pozos geotérmicos. Circuito abierto.

b) Sin extracción de fluido subterráneo

b.1) Con presencia de anomalía geotérmica

Pozos de intercambio geotérmico.

b.2) Con gradiente geotérmico normal

Bombas de calor con pozos geotérmicos. Circuito cerrado.

Los sistemas de bomba de calor con pozos geotérmicos, tanto en configuración abierta como cerrada, suma un total de *5191 MWth* en *Europa* en el año 2005, y el número de unidades instaladas crece a un ritmo del *30%* anual en los 3 principales países que lideran el desarrollo de esta tecnología: *Suecia, Alemania y Francia* [1].

La optimización de los materiales de intercambio de calor, y la alta eficiencia de las bombas de calor, permiten utilizar el subsuelo como foco frío o caliente de un sistema de climatización con bomba de calor. El subsuelo no sufre las oscilaciones térmicas superficiales, lo que implica un funcionamiento más equilibrado de la bomba de calor, con un menor consumo eléctrico, obteniendo coeficientes de transformación (COPs) entre 4 y 6 en calefacción y entre 10 y 12 en refrigeración (EER).

El Libro Blanco de la Energías Renovables [2] de la Unión Europea, reconoce la creciente importancia que esta adquiriendo la energía geotérmica de baja temperatura. La extrema dependencia energética externa de la Unión, ha creado un clima social de excepcional apoyo al desarrollo y utilización de fuentes de energía sostenibles, con fuertes inversiones y legislación específica. El objetivo es doble: reducir la factura energética de la Unión a la vez que se contribuye a la reducción de gases con efecto invernadero.

La energía geotérmica tiene un desarrollo escaso en España. Sin campos de alta temperatura (actualmente se están completando estudios en Madrid, Barcelona, Tenerife y las Palmas para una posible exploración profunda), los usos existentes no van mas allá del uso balneario de un centenar de afloramientos termales con temperaturas que oscilan entre los 20°C y los 78 °C.

Respecto al uso de los sistemas de bomba de calor con pozos geotérmicos, el conocimiento es bajo aunque se respira un ambiente de creciente interés en instaladores de otras energías renovables y empresas de perforación. Algunas comunidades autónomas han organizado jornadas sobre los usos de estos sistemas, aunque de momento carecen de una consideración legal específica.

Durante los últimos 20 años, la tecnología de explotación de yacimientos de baja temperatura ha avanzado enormemente. Se han mejorado los materiales de captación, desarrollado modelos matemáticos que intentan explicar la conducción de calor en el subsuelo, software específico para la simulación y el diseño de sistemas de intercambio

geotérmicos, han mejorado los sistemas de distribución e intercambio de calor y se han construido y desarrollado nuevos equipos que permiten el aprovechamiento de cantidades ínfimas de calor en la calefacción de espacios en superficie con rendimientos muy altos.

La Unión Europea continua financiando estas líneas de investigación y así, además del proyecto denominado GEOCOOL (refrigeración geotérmica), están en marcha el proyecto GROUNDHIT (*Ground Coupled Heat Pumps of High Technology Sexto Programa Marco 2004-08*) dedicado a mejorar la eficiencia energética de las bombas de calor geotérmicas y el proyecto LOW-BIN (*Efficient low temperature geothermal binary power Sexto Programa Marco 2006-09*) enfocado en la mejora de sistemas de producción eléctrica mediante fuentes geotérmicas de baja temperatura.

La geotermia de baja temperatura se muestra como una tecnología joven, aun por desarrollar, pero es un incuestionable nicho de oportunidad. Su aprovechamiento se fundamenta en un sólido estudio del medio físico y un análisis de las demandas donde puede ser aplicable. La investigación de las propiedades térmicas del subsuelo de un determinado área es el primer paso para evaluar económicamente esta alternativa energética endógena, renovable y respetuosa con el medio ambiente.

1.2.- JUSTIFICACIÓN

Los motivos por los cuales se quiere realizar la investigación son:

- 1) Se trata de una tecnología novedosa, con poco desarrollo, pero con mucho potencial que podría ocupar parte del mercado de sistemas de calefacción y refrigeración en España.
- 2) Ourense es la provincia que concentra el 90% de los afloramientos termales de Galicia, lo que indica la existencia de zonas con gradientes anormalmente altos. Es posible cuantificar la cantidad de Energía que puede proporcionar el subsuelo gallego.
- 3) Se trata de una energía alternativa, renovable y sin efectos al medio ambiente.
- 4) Es un recurso autóctono, cuyo aprovechamiento puede ayudar a fijar población en el territorio.
- 5) Los antecedentes muestran buenos resultados en otras regiones de Europa y sería interesante plantear esta investigación en el entorno español.
- 6) Las políticas comunitarias, nacionales y regionales poseen planes activos que promueven la utilización de este tipo de energías.
- 7) Los resultados obtenidos de la presente investigación aportarán datos útiles para la definición de los yacimientos geotérmicos en Galicia, ayudando a planificar los perímetros de protección del recurso minero-medicinal.
- 8) Actualmente el termalismo ha cobrado un nuevo impulso en el territorio español. Se trata de un turismo de salud ampliamente demandado por todos los sectores de la sociedad y que se basa en la explotación de agua geotérmica. La presente investigación permitirá optimizar el diseño de los pozos de extracción y maximizar

la recuperación de calor con el fin de reducir los costes fijos que posee la empresa balnearia.

1.3.- HIPÓTESIS DE TRABAJO

Las soluciones geotérmicas de baja y muy baja temperatura están siendo utilizadas en el Norte de Europa y Estados Unidos con notables resultados de eficiencia energética y ahorro económico. Al tratarse de un sistema dual (calor/frío), las bombas de calor con pozos geotérmicos *BCG* permiten cubrir las necesidades térmicas de una edificación/uso/servicio, con coeficientes de transformación (COPs) muy superiores a otros sistemas convencionales.

España es un país que importa el 85% de su energía primaria, lo que implica un clima de apoyo y búsqueda de alternativas eficientes, ecológicas y renovables que permitan reducir la factura energética global. La incorporación del uso de energías renovables al Código Técnico de la Edificación obliga a que cada edificación española cubra un mínimo de un 30% de sus consumos energéticos mediante energías renovables.

La energía geotérmica de baja temperatura se muestra como un recurso energético eficiente que debe ser evaluado en España como solución de diseño de edificaciones sostenibles.

Conocidos los avances en otros países respecto a la energía geotérmica de baja temperatura, nos planteamos evaluar su eficacia en el NW de España. De acuerdo a los parámetros de diseño descritos en la bibliografía científica, consideramos que en el NW

de España, con un subsuelo predominantemente granítico, fracturado y generalmente saturado, las condiciones hidrogeológicas resultan favorables para obtener un flujo de calor estable (>60-80 W/m pozo) que abastezca el 75% de las necesidades térmicas de una climatización superficial.

Dada cuenta los elevados costes que supone la perforación en rotoperforación, lodos o martillo odex en España, es necesario comparar la eficiencia obtenida en relación a la inversión inicial necesaria. Asimismo, se ha de tener en cuenta la mejora medioambiental producida, ya que en un futuro no muy lejano, el consumo de combustibles fósiles será penalizado económicamente en todos los países de la Unión.

1.4.- OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar, evaluar y comparar la viabilidad económica del uso de bombas de calor con pozos de intercambio geotérmicos en la ciudad de Ourense (NW España).

Objetivos particulares

Estudiar las condiciones hidrogeológicas (litología, temperatura estable, conductividad térmica) del área de estudio para establecer a detalle los parámetros de diseño del sistema geotérmico.

Diseñar y construir un equipo móvil de monitoreo de las propiedades térmicas (conductividad térmica $W/m \cdot K$) en pozos de intercambio geotérmico.

2.- ANTECEDENTES

Las bombas de calor con pozos geotérmicos (*bombas de calor geotérmicas, energía geotérmica de muy baja temperatura, closed loop heat pumps, ground coupled heat pumps*) es una tecnología de generación de energía térmica mediante la combinación de una máquina de accionamiento eléctrico (bomba de calor) y un foco de intercambio geotérmico (pozos geotérmicos).

Con más de 15 años de experiencias, fundamentalmente en el Norte de Europa y Estados Unidos, su alto rendimiento tanto en modo calor como frío, así como la robustez y flexibilidad de diseño de este tipo de sistemas, han hecho que, actualmente, esta tecnología tenga un crecimiento superior al 30%, sustituyendo completamente otros sistemas de climatización con menor eficacia.

2.1 ESTADO DEL ARTE

“El uso directo de la energía geotérmica es uno de los métodos más viejos, más versátiles y también la forma más común de utilización de la energía geotérmica” [3]. Los romanos ya utilizaban los vapores de Río Caldo (Ourense, NW España) en el siglo II d.c. para el calentamiento de un complejo balneario.

El conjunto de tecnologías conocidas como aprovechamientos geotérmicos de baja y muy baja temperatura están presentes en 72 países (los descritos en la bibliografía científica y congresos) con una capacidad térmica total de 28.268 MWt (Megawattios térmicos) en el año 2005 [4]. Para su obtención, se han usado 75.943 GWh/año lo que representa un aumento del 43% respecto al año 2000, con una tasa media de crecimiento

anual de 7.5%. La explotación de esta fuente de energía renovable ha evitado el consumo de 170 millones de barriles de petróleo y la emisión de 24 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera [4].

España se sitúa en el puesto 49 con 22,3 MWt de capacidad instalada en 2005. Los países que la encabezan son Estados Unidos, Suecia, China, Islandia y Turquía.

Tabla 1.- Capacidad instalada y numero de unidades de bomba de calor por país

PAIS	MWth	GWh/año	Numero de unidades
<i>Estados Unidos</i>	8.400	7.200	700.000
<i>Suecia</i>	3.840	10.000	320.000
<i>Suiza</i>	532	800	44.000
<i>Canada</i>	446	600	37.000
<i>Alemania</i>	400	610	33.000
<i>Austria</i>	300	400	25.000

Los datos existentes acerca de los usos en España se describen en el informe presentado para el *World Geothermal Congress de Turquía* (2005) donde se mencionan la existencia de 70 aplicaciones a pequeña escala (en ellas se incluyen el aprovechamiento térmico para agua caliente sanitaria y calefacción de balnearios como el de Lugo, Arnedillo (La Rioja) o Fitero (Navarra). El uso principal se realiza en la calefacción de invernaderos, con un total de 10 Hectáreas, en las zonas de Montbrío del Camp (Tarragona), Cartagena, Mazarrón (Murcia) y Zújar (Granada) [5].

España se ha mantenido históricamente expectante respecto al desarrollo de su energía geotérmica. En un país con un costo relativamente barato de la energía eléctrica (debido a la excepcional aportación de las hidroeléctricas españolas), los únicos estudios relativos a posibles aprovechamientos de campos geotérmicos se remontan a 1980 [6][7][8]. En esa época, los objetivos de evaluación de los diferentes campos se orientaban a la búsqueda de recursos de alta temperatura con los que poder generar

electricidad. Aunque se llegaron a perforar 3 pozos de entre 2500 y 3300 metros de profundidad a principios de los años ochenta, la investigación se interrumpió por los elevados costes de las perforaciones. Estos mismos estudios ya apuntaban que en dichas zonas estudiadas térmicamente se podrían concretar proyectos de aplicación directa del calor.

Desde entonces, la investigación geotérmica en España se ha mantenido inmóvil, a excepción de estudios puntuales realizados por empresas privadas o universidades para explotaciones balnearias [9][10][11][12]. Es en el año 2003 cuando se desarrolla por primera vez un estudio en España de aprovechamientos de calor geotérmico de baja temperatura para calefacción y aire acondicionado en Valencia [13]. El proyecto GEOCOOL fue financiado en parte por la Comisión Europea (*Proyect NNE5-2001-00847 2003-2006*) y coordinado por el Instituto de Eficiencia Energética de la Universidad Politécnica de Valencia. El objetivo global del proyecto fue desarrollar un equipo completo de climatización (calor y frío) de bomba de calor con pozos geotérmicos económico, eficiente y respetuoso con el medio ambiente, orientado a su aplicación en las regiones mediterráneas del oriente de España. Esta investigación ha obtenido coeficientes de eficiencia (SPF *Seasonal Performance Factor*) un 73% más alto que los sistemas convencionales, en modo calefacción (42% menos de consumo eléctrico) y 60% superior en modo enfriamiento (38% menos de consumo eléctrico).

Europa

Los principales investigadores y empresas relacionadas con esta tecnología se ubican en el Norte y Centro de Europa, donde las condiciones climatológicas exigen unas mayores demandas de recursos de calefacción en todos los sectores. Al contrario que en

Estados Unidos, las Bombas de Calor Geotérmicas en Europa se utilizan casi exclusivamente para la producción de calor. En los últimos años esta tecnología se está implementando en países como Grecia y el Oeste de Turquía, si bien aun se encuentra en fase de validación experimental.

Suiza y Suecia abrieron el camino con estudios teóricos y experimentales (simulación y validación experimental) que permitieron establecer una base matemática sólida para el diseño y evaluación de la eficiencia de los sistemas de intercambio subterráneos (*Rybach y Hopkirk, 1995 [14]; Rybach y Eugster, 1997 [15]*). Anteriormente, los suecos centraron sus investigaciones en el análisis teórico de la transferencia de calor en pozos subterráneos (*Claesson y Eskilson, 1988; Eskilson y Claesson, 1988*). Sanner (1986) inició las primeras pruebas del sistema BCG en Alemania. **[16-18]**

Actualmente, con las variables de cálculo de sistemas BCG ampliamente estudiadas (manuales de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado ASHRAE y la Agencia Internacional de la Energía IEA) y varios programas específicos desarrollados para cada tipo de sistema (*Earth Energy Designer EED – Hellstrom, 1994, Ground Loop Heat Exchanger Design for Commercial Applications GLHEPRO – Spitler, 2000, Pagano, Katsura Takeda, 2006, Ground Loop Design GLD, 2006*) **[19-22]**, la investigación se centra en otros 2 aspectos particulares y básicos para el diseño de estas instalaciones:

- La determinación in situ de las propiedades térmicas (conductividad y difusividad térmica) del subsuelo mediante test de respuesta térmica.

- La selección de materiales para el sellado de los pozos de intercambio que aumenten la conductividad térmica del pozo.

Los cálculos realizados para el diseño de las instalaciones se basan en valores teóricos de conductividad térmica en función del tipo de material que conforma el subsuelo. Esto llevaba en algunos casos a un sobredimensionamiento de las instalaciones o a que la instalación no cubriera las demandas esperadas. En ambos casos, la insatisfacción del cliente y el aumento de los costes de instalación (por otro lado ya superiores a una instalación convencional de combustible fósil) hacen perder la confianza del mercado en unos sistemas que no tienen un gran desarrollo histórico.

Debido a esto, los equipos de investigación se esforzaron en desarrollar un método que permita calcular los valores específicos de conductividad del subsuelo donde se va a desarrollar la instalación, así como la resistencia térmica de la lechada de relleno que une las tuberías de intercambio con el subsuelo circundante. El Test de Respuesta Térmica (TRT) se desarrolló en Suecia y en Estados Unidos (*Eklöf y Gehlin, 1996; Austin, 1998 [23-24]*), mostrándose como un método eficaz para subsanar estos errores.

En las figuras 1 a 4 se muestran la evolución de los diferentes usos directos de la energía geotérmica de baja entalpía y como los sistemas BCG acaparan más del 50% de la capacidad instalada dentro de este intervalo de aplicaciones.

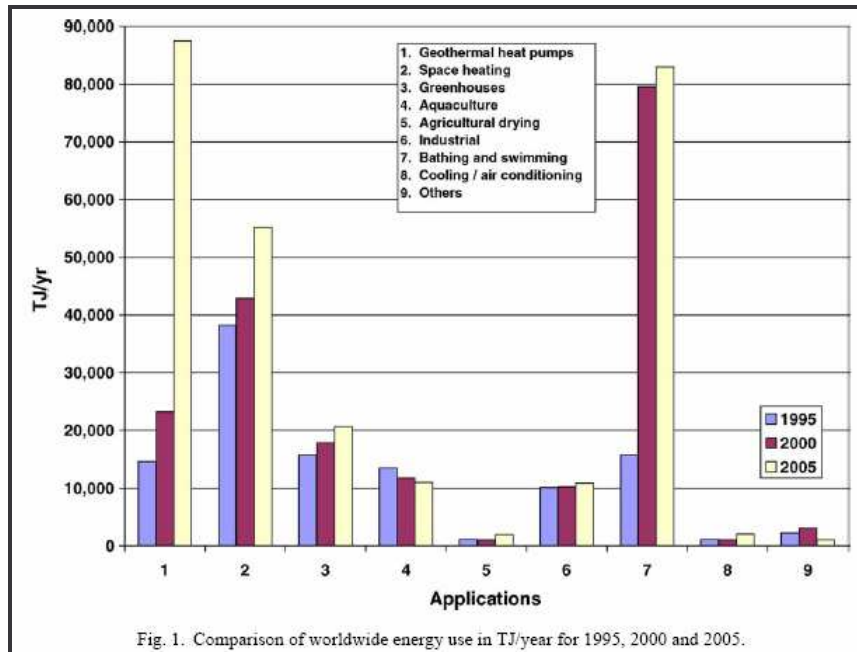


Fig 1.- Comparación del uso de energía 1995, 2000 y 2005 [4]

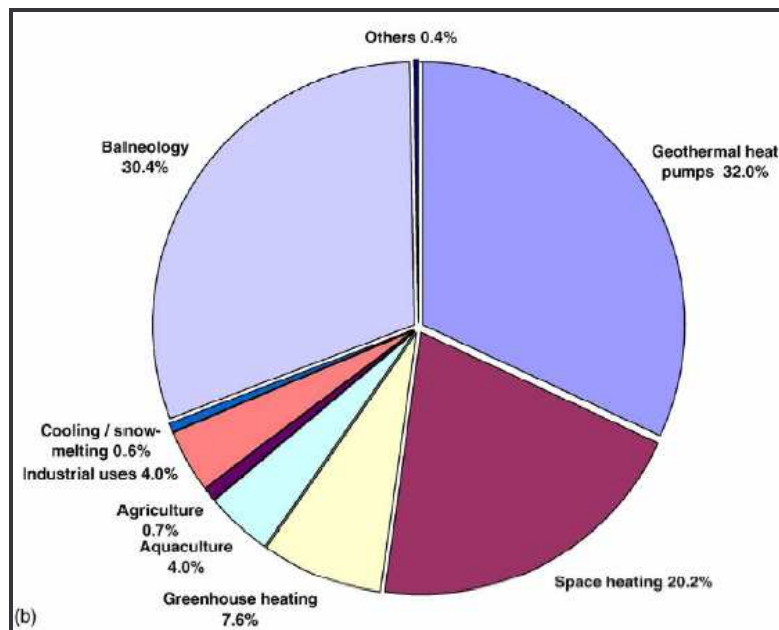


Fig 2.-Porcentaje de energía según uso [4]

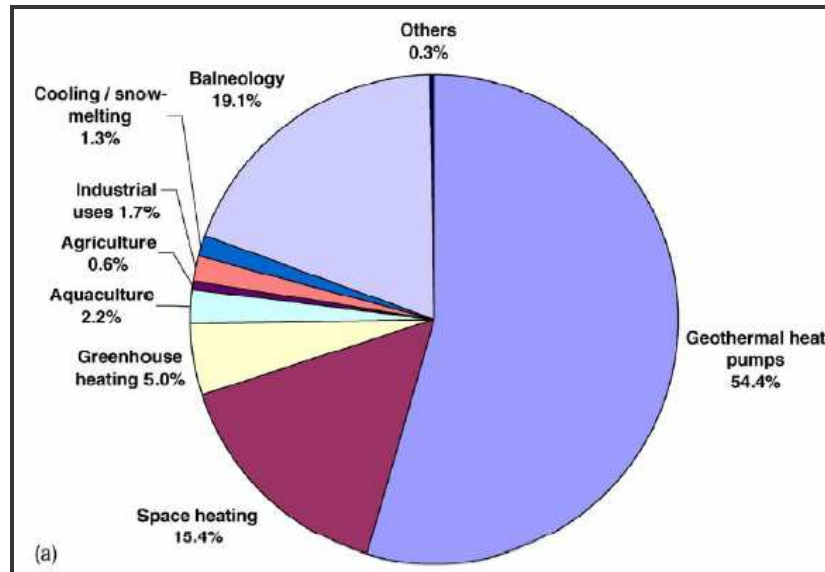


Fig 3.-Distribución por porcentaje del total de capacidad instalada [4]

2.2 COMPONENTES DE UNA SOLUCIÓN GEOTÉRMICA

La Tierra actúa como un acumulador de energía solar. El 46% de la energía radiante emitida por el Sol se almacena en el subsuelo, lo que hace que a partir de una determinada profundidad (aproximadamente 8-9 metros), la temperatura del subsuelo se mantenga prácticamente constante (Figura 4).

Los sistemas de climatización mediante bombas de calor unidas a pozos geotérmicos BCG permiten explotar esta propiedad del subsuelo. Los pozos geotérmicos actúan como focos de calor en invierno y como sumideros en verano, permitiendo obtener calefacción y refrigeración mediante un único sistema de climatización. Asimismo, las soluciones geotérmicas permiten tener agua caliente sanitaria a disposición en cualquiera de los modos de funcionamiento (calefacción y refrigeración).

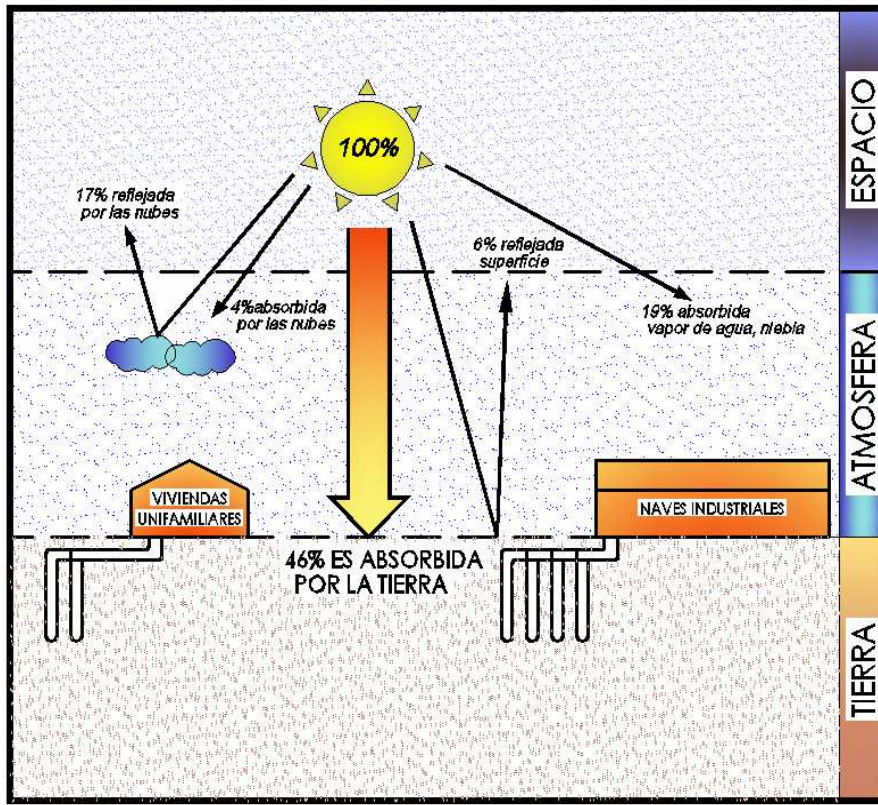


Fig 4.- Distribución espacial de la energía emitida por el Sol

Los componentes de una solución geotérmica (Figura 5) son:

2.2.1 Cargas térmicas del espacio a climatizar

Una solución geotérmica se diseña para cubrir unas necesidades específicas de calefacción y/o refrigeración determinadas, entre otros parámetros, por las características constructivas del espacio a climatizar, su ubicación, uso y las condiciones climáticas de la zona. Este parámetro de diseño es esencial para el adecuado dimensionado de la solución geotérmica.

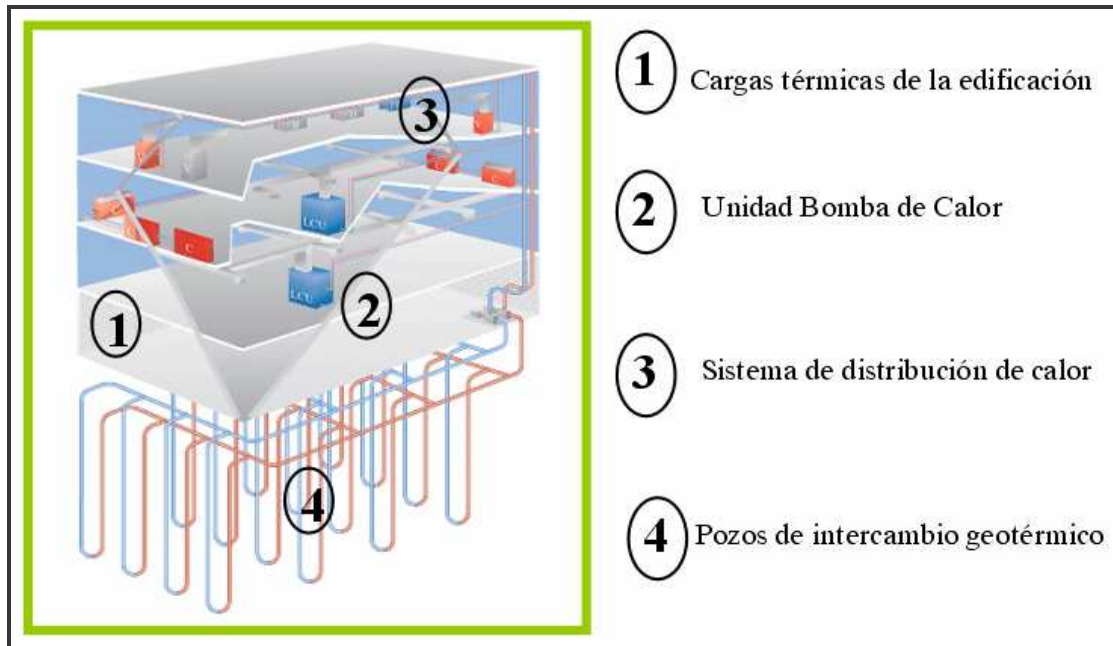


Fig 5.- Elementos de un sistema de climatización geotérmico

2.2.2 Subsistema bomba de calor

La tecnología actual permite, a partir de cantidades mínimas de calor, producir otro fluido a mayor temperatura aprovechable para la calefacción de espacios. Esta transformación se realiza a través de una máquina térmica que se denomina Bomba de Calor capaz de transferir calor de una fuente fría a otra más caliente.

El principio de funcionamiento de las bombas de calor proviene del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas evoluciona cíclicamente, es comprimido y posteriormente expandido, obteniendo frío y calor.

La mayor parte de las BC existentes en el mercado trabajan con el ciclo de compresión de un fluido condensable (Figura 6). Sus componentes principales son el compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, los cuales se conectan en un circuito cerrado por el que circula un fluido refrigerante.

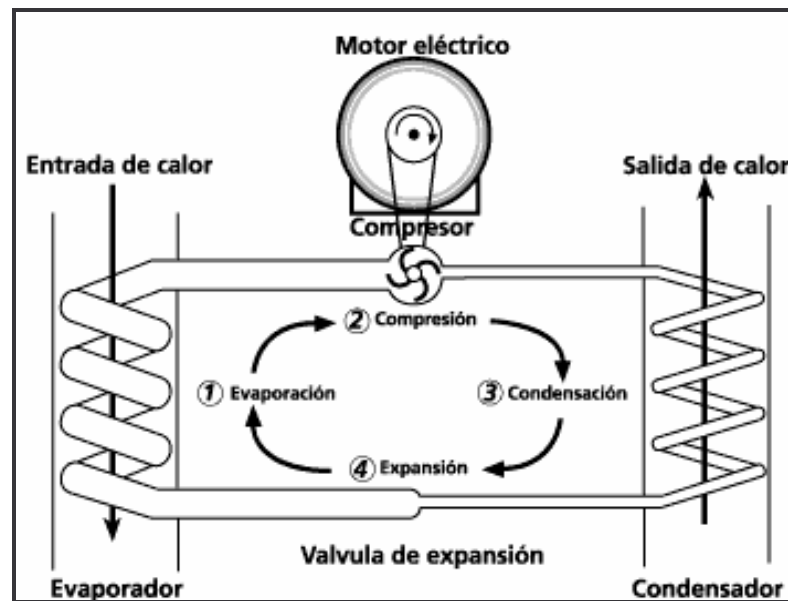


Fig 6.- Esquema de funcionamiento de una BC de compresión mecánica

El ciclo se desarrolla en las siguientes etapas:

1. En el evaporador la temperatura del fluido refrigerante se mantiene por debajo de la temperatura de la fuente de calor (foco frío), de esta manera el calor fluye de la fuente al fluido refrigerante propiciando la evaporación de éste.
2. En el compresor el vapor que sale del evaporador es comprimido elevando su presión y temperatura.
3. El vapor caliente accede al condensador. En este cambiador, el fluido cede el calor de condensación al medio (calefacción).

4. Finalmente, el líquido a alta presión obtenido a la salida del condensador se expande mediante la válvula de expansión hasta alcanzar la presión y temperatura del evaporador. En este punto el fluido comienza de nuevo el ciclo accediendo al evaporador (refrigeración).

Si así se requiere, las bombas de calor pueden construirse reversibles, para proporcionar calefacción y refrigeración con una misma máquina. Esto se realiza incorporando una válvula de 4 vías que permite la inversión de circulación del fluido frigorífico (Figura 7).

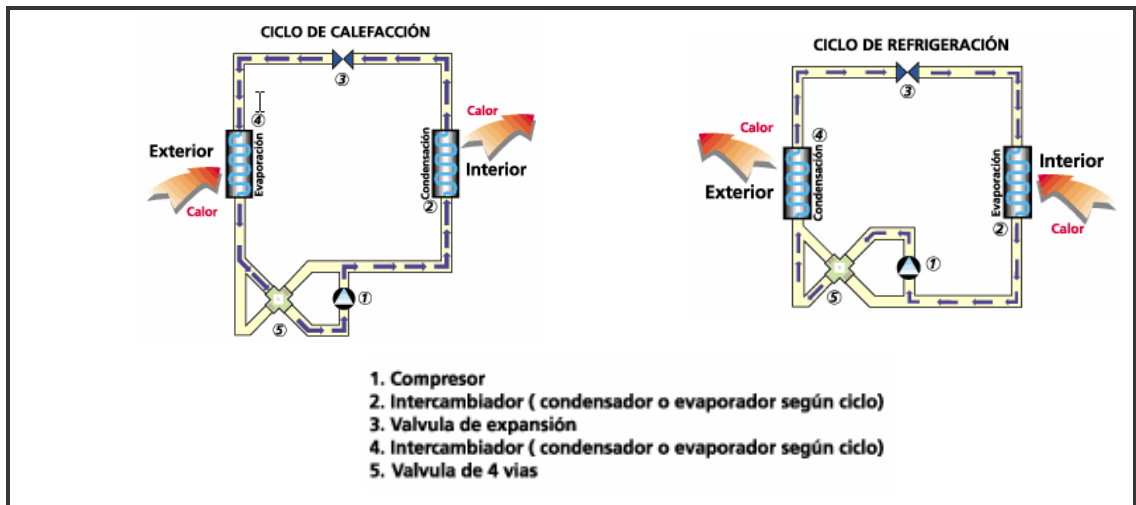


Fig 7.- Esquema de funcionamiento de una BC de compresión mecánica reversible

Rendimientos

Los sistemas de bomba de calor son uno de los equipos de mayor rendimiento del mercado, de ahí su gran expansión. El ahorro de energía, que es lo mismo que decir, ahorro de dinero. Por cada kilovatio de consumo de la red eléctrica, se consiguen 3 kilovatios de rendimiento en calor; lo cual equivale a decir que consumiendo la misma energía eléctrica, la Bomba de Calor suministra entre 3 y 4 veces más calor que un sistema de calefacción eléctrica.

Las bombas de calor se han venido utilizando durante los últimos 70 años desde su invención después de la crisis energética de los años 30 en Estados Unidos. La aplicación más reconocida y cuyo funcionamiento se realiza por medio de una BC son los refrigeradores existentes en cualquier vivienda. En este caso, la BC extrae el calor del interior de la nevera y lo transfiere al ambiente de la cocina, consumiendo una determinada cantidad de energía eléctrica.

También son cada vez más comunes las bombas de calor utilizadas para la refrigeración de viviendas. Los aires acondicionados no son más que bombas de calor aire-aire que extraen el calor de la vivienda y lo transfiere al aire exterior, consumiendo a su vez energía eléctrica. El problema radica en que cuanto mayor sea la temperatura exterior (es decir cuando mayor es la demanda de aire acondicionado) este intercambio consume cada vez más energía eléctrica, disminuyendo sustancialmente el rendimiento de la máquina y aumentando los costes de funcionamiento.

Las BC Geotérmicas (Figura 9) subsanan este gran problema de las bombas de calor (tanto en modo calefacción como refrigeración) proporcionando una fuente estable de calor (el subsuelo) cuando funciona en modo calefacción y un sumidero de temperatura prácticamente invariable en el que almacenar el calor que sobra en verano.



Fig 9.- Subsistema Bomba de Calor (BC)

2.2.3 Subsistema Distribución interior de calor/frío

Según el medio de origen y destino de la energía, las bombas de calor se denominan mediante dos palabras. La primera corresponde al medio del que absorbe el calor (foco frío) y la segunda al medio receptor (foco caliente). Los focos fríos y calientes y las distintas denominaciones de BC que dependen de estos focos se dan en las tablas 2 y 3, respectivamente.

Tabla 2.- Focos fríos y calientes de una bomba de calor

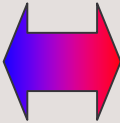
Foco Frío		Foco Caliente
Aire		Aire
Agua		Agua
Tierra		

Tabla 3.- Clases de bombas de calor

Denominación	Sistema de distribución de calor/frío
Aire – Aire	Fan coils
Aire – Agua	Fan coils Radiadores de alta emisividad Suelo radiante
Agua – Aire	Ventiladores de aire
Agua – Agua	Fan coils Radiadores de alta emisividad Suelo radiante
Tierra – Aire	Ventiladores de aire
Tierra – Agua	Fan coils Radiadores de alta emisividad Suelo radiante

2.2.4 Subsistema Pozos de Intercambio Geotérmico

La variabilidad térmica entre el día y la noche que se aprecia en superficie se va atenuando a medida que se profundiza en el subsuelo. A partir de 15 metros la temperatura del subsuelo se mantiene prácticamente constante con valores comunes entre 7 y 13°C (Figura 10, 11).

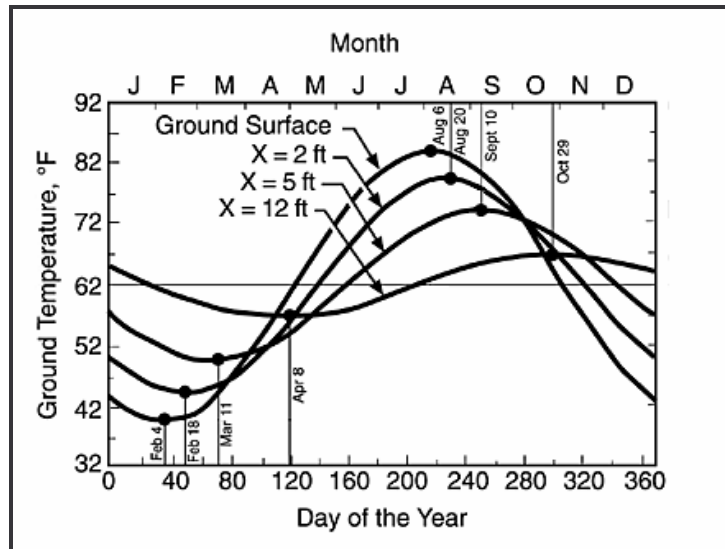


Fig 10.- Variación estacional de la temperatura del subsuelo en función de la profundidad [23]

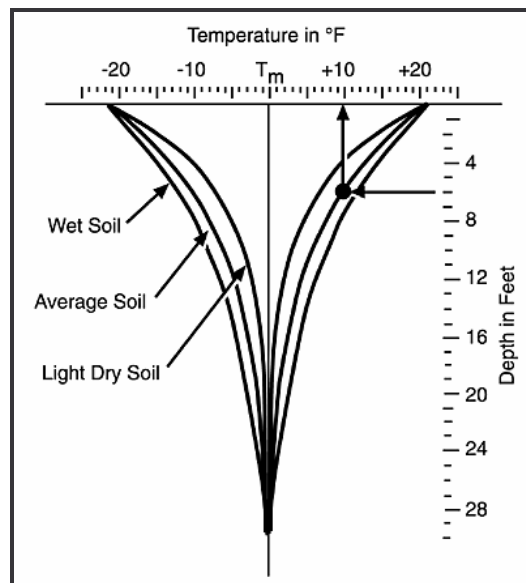


Fig 11.- Variación de la temperatura en profundidad respecto a la temperatura media del pozo [23]

1) Bucle abierto (Figura 12)

Un sistema de bucle abierto utiliza normalmente un pozo convencional como su fuente de calor. El agua se bombea del pozo a través

del intercambiador térmico de la bomba de calor, donde el calor se extrae y transfiere a un sistema refrigerante. A continuación, el calor se transfiere al aire de la casa. Posteriormente, el agua se regresa a un estanque, arroyo o segundo pozo (inyección). Las condiciones locales, como la cantidad y calidad de agua disponible, pueden afectar el uso de este tipo de sistemas. Los reglamentos locales sobre uso y disposición del agua limitan también el uso de sistemas de bucle abierto.

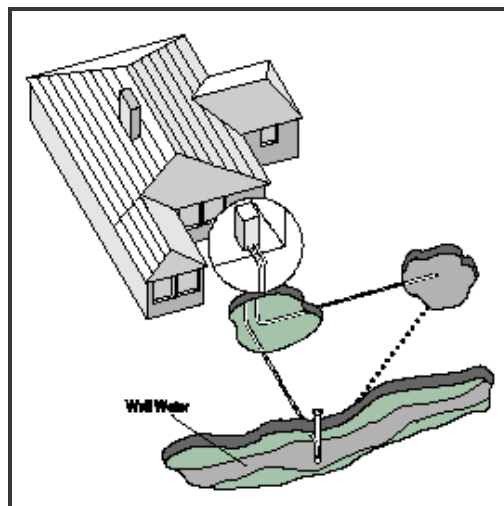


Fig 12.- Esquema de un sistema de bucle abierto

2) Bucle cerrado (Figura 13)

Los sistemas de bucle cerrado circulan un fluido de transferencia térmica (por lo general, una solución de agua y anticongelante) por medio de un sistema de tubería de plástico enterrada, acomodada en forma horizontal o vertical. Los sistemas de bucle horizontales toman el calor de los bucles de la tubería enterrada a una profundidad de 1.6-2.4 m en trincheras o estanques. Los sistemas de bucles verticales utilizan hoyos perforados de 50-100 m de profundidad con bucles de tubería en forma

de U (Figura 14). Funcionan de manera similar a los sistemas de bucles horizontales, pero pueden instalarse en lugares donde el espacio es limitado debido al tamaño, el entorno u otros factores.



Fig 13.- Bucle vertical



Fig 14.- Tubería PE alta densidad doble U en pozo de intercambio geotérmico.

2.3 EFICACIA DE LOS SISTEMAS DE BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICAS

Las BCG consumen entre 0.22-0.35 KWh de electricidad por cada KWh de calefacción o refrigeración producida, el cual es entre un 30 y un 50% menos que el consumo energético estacional de una bomba de calor aire-aire. El COP dependerá de la temperatura de entrada del agua del circuito de intercambio hacia la BC, la cual a su vez dependerá de las condiciones geológicas (parámetros térmicos e hidráulicos del subsuelo) y parámetros técnicos del sistema diseñado (longitud y tipo de tubería de intercambio, disposición, tipo y calidad del relleno).

En general, los pozos de intercambio verticales muestran una mayor transformación y eficiencia energética que los sistemas de intercambio horizontales (*Water-Source Heat Pump Engineering Committee, Estados Unidos*[32]).

Tabla 04.- Coeficientes de transformación mínimos de las BCG

	<i>Calefacción</i>	<i>Refrigeración</i>
<i>Menos 40 KW ARI standards</i>	2.5	2.9
	<i>Calefacción</i>	<i>Refrigeración</i>
<i>ASHRAE 90.1</i>	3.1	3.9
	<i>T^a fuente = 0°C T^a calefacción = 35 °C</i>	<i>T^a fuente = 0°C T^a calefacción = 50 °C</i>
<i>Suiza Heat Pump Test Centre</i>	5	3.5

El COP práctico es ligeramente inferior a los valores ofrecidos anteriormente, rondando los valores de 3-3.8. En sistemas con alta calidad de los componentes y buen diseño de los pozos de intercambio se alcanzan valores de 4 - 4.5 utilizando depósitos de

inercia acoplados a la BCG. Los depósitos de inercia reducen el numero de arranques de la BCG al conservar el calor y el frío de una manera más constante.

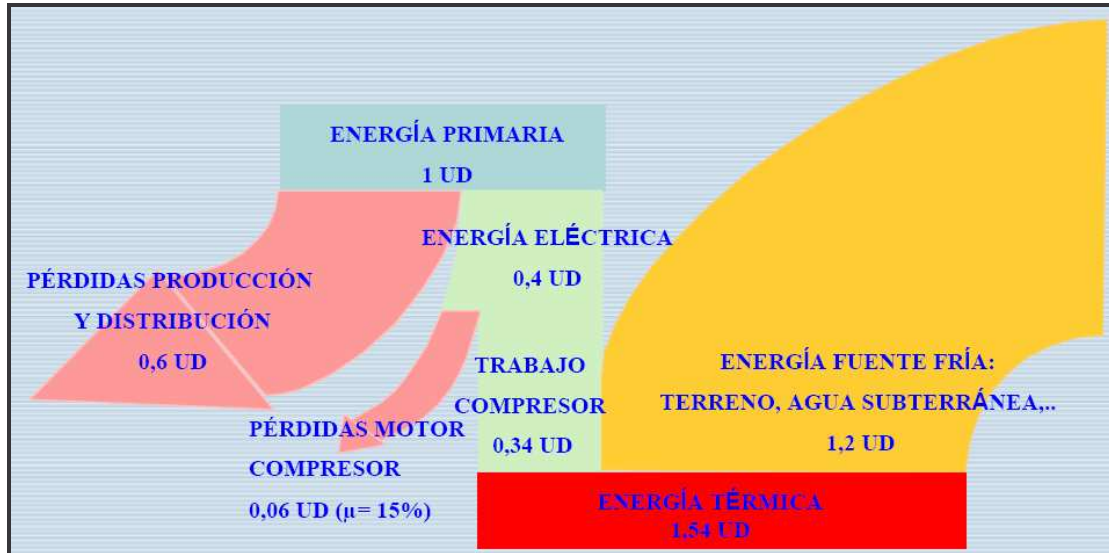


Fig 15.- Diagrama de Sankey. Modificado de Monasterio et al (1993) [25]

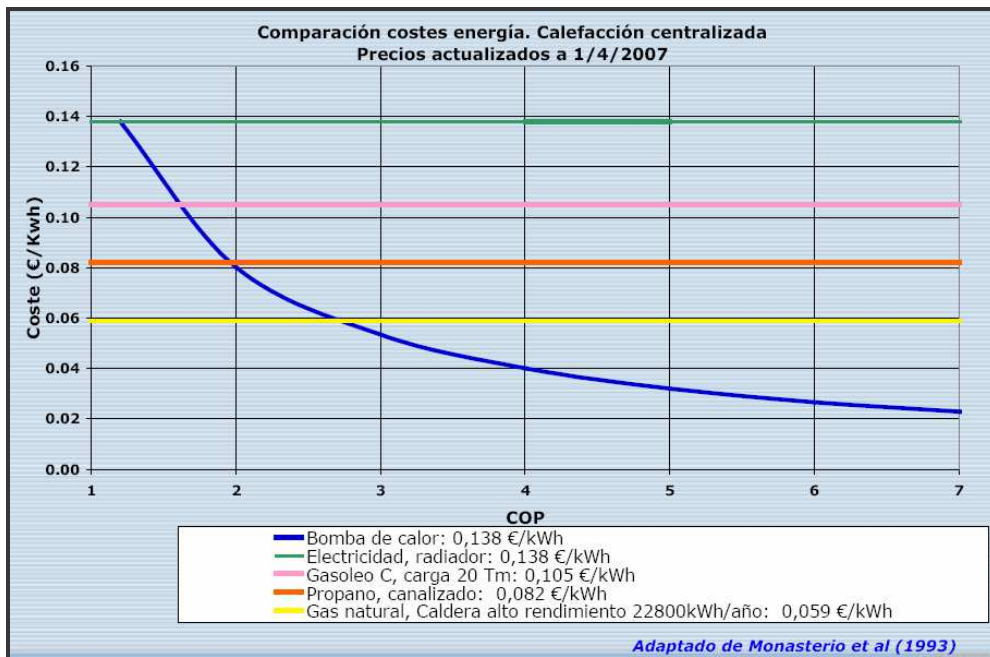


Fig. 16.- Comparación de los costes de energía de diferentes sistemas de calefacción

3.- METODOLOGÍA

La metodología aquí descrita para el diseño de una solución geotérmica es la recomendada por la Asociación Internacional de Bombas de Calor Geotérmico (IGSHPA) [26-27].

La definición de las cargas térmicas interiores y por ende, la selección de la capacidad de la bomba de calor necesaria para suplir esas necesidades se encuentra ampliamente descrita en manuales y artículos técnicos, dada cuenta que este paso no difiere en absoluto respecto al diseño de los sistemas convencionales. Nos centraremos en este apartado en la metodología de diseño de los pozos de intercambio geotérmico, elemento novedoso del sistema y cuya definición es esencial para un funcionamiento óptimo de la bomba de calor agua/agua.

Es por ello que para iniciar el proceso de diseño de los intercambiadores enterrados, debemos conocer previamente los siguientes datos respecto a la bomba de calor seleccionada:

- Caudal de agua del foco térmico requerido por la bomba de calor.
- Tipo de fluido circulante (solamente agua o agua más anticongelante).
- Temperatura mínima de entrada a bomba esperada.

El proceso de diseño aquí descrito se refiere a sistemas completamente cerrados, sin extracción de fluido del subsuelo, solamente calor, dada cuenta la extrema dificultad en España para plantear el aprovechamiento en circuitos abiertos debido a las altas exigencias legislativas respecto a los consumos de agua subterránea. Asimismo, la

eliminación del caudal bombeado representaría un problema añadido, dada cuenta que la inyección no es siempre viable y su vertido a cauces esta muy limitada.

PASO 1 Configuración del sistema de intercambio

Se debe seleccionar un tipo de configuración de intercambio con el subsuelo: a) Tuberías en Horizontal; b) tuberías en vertical. En general, resulta más económico distribuir las tuberías horizontalmente en el subsuelo, si bien el espacio requerido es mayor. Además, la oscilación térmica del fluido circulante es mayor, lo que provoca menores rendimientos del sistema geotérmico. Las características urbanísticas del norte de España hacen que la configuración horizontal sea en la mayoría de los casos inviable, dada cuenta la limitación de espacio y la superficialidad a la que se encuentra la roca cristalina. Existen cuencas terciarias donde si sería posible plantearse una configuración horizontal, si bien estas representan una mínima parte del territorio en el norte de España.

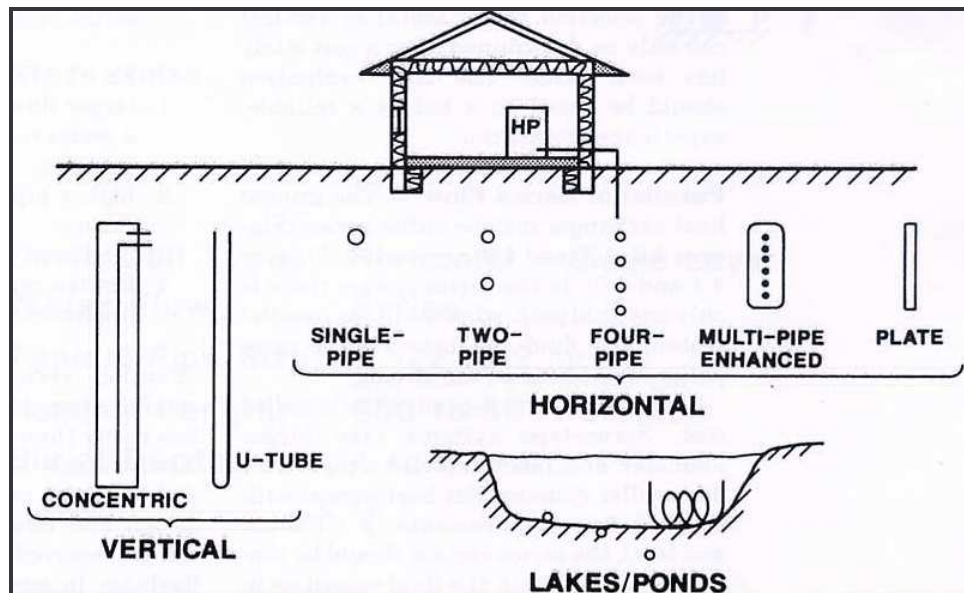


Fig. 17.- Diferentes configuraciones de la tubería de intercambio en el subsuelo

PASO 2 Tubería y velocidad mínima de circulación

Los materiales de intercambio deben ser tuberías de polietileno y polibutileno. Este tipo de material es flexible y permite fusionarlo mediante calor creando uniones de extrema resistencia. Las especificaciones recomendadas son:

- PB 2110, SDR 13.5
- PB 21.10, SDR 17
- PE 3408, SDR 11
- PE 3408, SCH 40

Para las tuberías de intercambio, se debe seleccionar aquella que tenga menor espesor, mientras que para las tuberías de cabeza, se deben seleccionar aquellas con mayor espesor para proporcionar rigidez estructural.

El diámetro seleccionado debe ser un acuerdo entre:

- Evitar potencias de bombeo excesivamente grandes (mayores costes de operación).
- Asegurar un flujo turbulento en el interior de las tuberías que mejorará la transferencia térmica entre el fluido y las paredes de la tubería.

PASO 3 Determinación de la temperatura media estable del subsuelo (TES)

Es necesario conocer la Temperatura media (T_m) constante del subsuelo para configuraciones verticales. Existen diferentes métodos analíticos y experimentales para aproximar este valor, si bien T_m , en configuraciones verticales, se asume igual a la temperatura del agua subterránea, o la temperatura media anual del aire en el lugar más 1.1 °C. en áreas con anomalías geotérmicas, la temperatura del agua

subterránea e un buen indicador para establecer la temperatura media estable del subsuelo (TES °C).

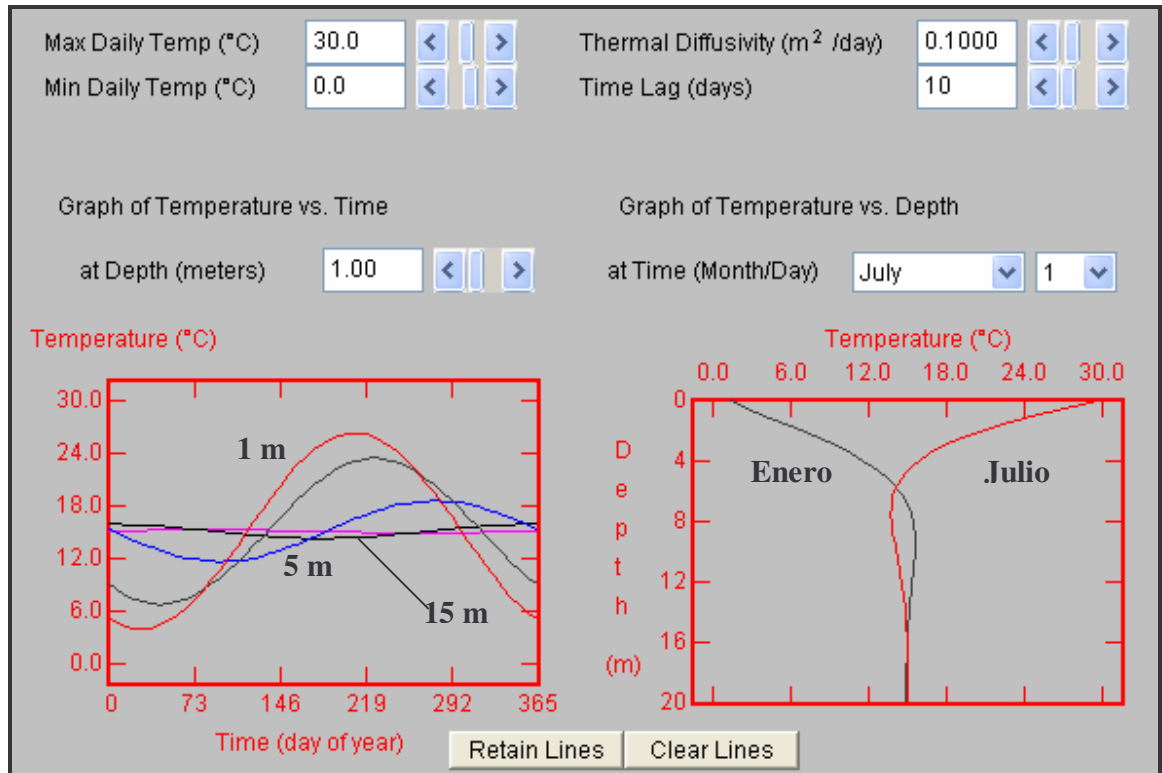


Fig. 18.- Modelo sinusoidal para la determinación de TES [28]

PASO 4 Determinación de las temperaturas máximas y mínimas del subsuelo

Para profundidades superiores a los 20 m, la temperatura del subsuelo se puede considerar prácticamente constante. Sin embargo, en configuraciones verticales, estos primeros 20 metros sufren la oscilación diaria y estacional provocada por la temperatura ambiente superficial.

Es necesario conocer la temperatura máxima (T_{max}) y mínima (T_{min}) que ocurren en el ciclo anual para cualquier día del año en cualquier profundidad.

El modelo matemático sinusoidal desarrollado por el departamento de suelos de la universidad de Oklahoma State nos da una buena aproximación de estas variaciones en función de la temperatura máxima y mínima diaria y la difusividad térmica ($m^2/día$) del suelo.

PASO 5 Determinación de las temperaturas máximas y mínimas del agua a la bomba de calor

Las especificaciones técnicas de la bomba de calor indicarán los rangos de temperaturas del foco de calor en los que puede trabajar la máquina. Usualmente las bombas de calor agua-agua o agua-aire permiten trabajar con un intervalo de temperaturas entre -4 y 40 °C, si bien este dato debe confirmarse con el proveedor del equipo.

Una primera aproximación es considerar una temperatura de entrada del agua a la bomba (EWT) mínima igual a 16.6 – 22.2 °C por encima de la temperatura mínima ambiente del lugar en modo calefacción. En modo refrigeración, se asume una EWT máxima de 37.7 °C.

PASO 6 Determinación de la resistividad térmica de las tuberías (m^*K / W)

La resistividad térmica para configuraciones verticales se calcula mediante la expresión:

$$R_p = \frac{1}{2 * \pi * k_p} * \ln \left[\frac{D_{oe}}{D_{oe} - (D_o - D_i)} \right]$$

siendo

R_{pe} = Resistividad térmica de la tubería en m^*K / W

K_p = Conductividad térmica de la tubería de polietileno W/m K

D_o = Diámetro externo de la tubería en m

D_{oe} = diámetro externo equivalente para más de 1 tubería en m

D_i = diámetro interno de la tubería en m

PASO 7 Determinación de la resistividad térmica del subsuelo R_s

La determinación de la resistividad térmica del subsuelo resulta un proceso complejo debido a las heterogeneidades del subsuelo y los diferentes modos de funcionamiento del sistema en modo calefacción y refrigeración. Existen valores tabulados en la bibliografía de la conductividad y difusividad térmica de diferentes tipos de suelos y rocas [29] los cuales se utilizan para determinar la resistividad térmica mediante la teoría del foco lineal [30] o el modelo de foco cilíndrico de Carslaw y Jaeger [31]. Para sistemas con un número relativamente pequeño (<5) de pozos de intercambio geotérmico, la solución de Ingersoll es aceptada, encontrando en los manuales de diseño [26] los valores para un funcionamiento continuo de 1500 horas.

PASO 8 Cálculo del porcentaje de funcionamiento en calefacción y refrigeración (F_h)

El porcentaje de funcionamiento para el mes de diseño (F_h) es el número de horas que se prevé entre en acción el compresor de la bomba de calor para el modo de funcionamiento y mes de diseño. Este valor dependerá de la temperatura ambiente exterior y de la relación entre la carga máxima de la edificación y la capacidad máxima de la bomba de calor.

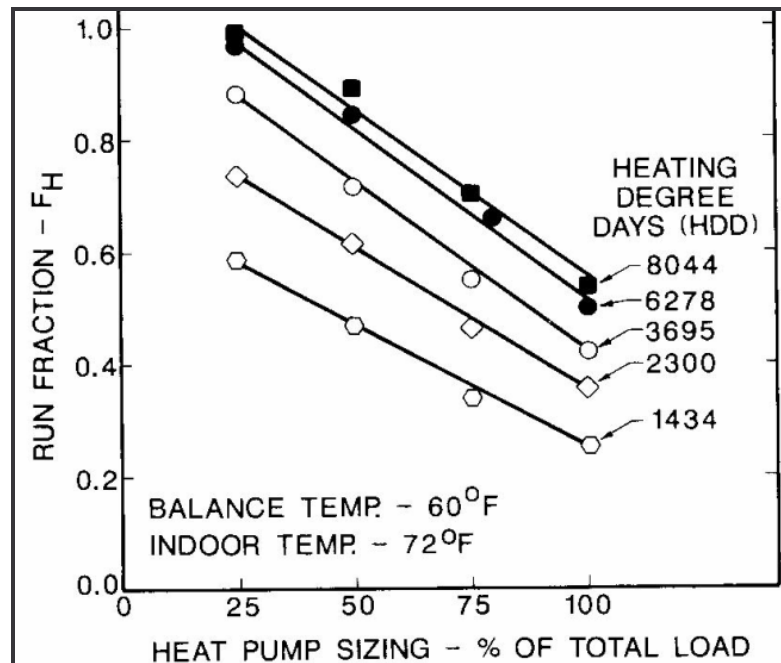


Fig. 19.- Porcentaje de funcionamiento en modo calefacción [26]

PASO 9 Cálculo de la longitud del intercambiador geotérmico

Definidos los parámetros anteriores, se utiliza la ecuación de Ingersoll [30] para el diseño de los intercambiadores enterrados:

Modo calefacción

$$L_c(m/KW) = \frac{0.001 * \left(\frac{COP_c - 1}{COP_c}\right) * (R_p + R_s * F_c)}{T_{min} - EWT_{min}}$$

Modo refrigeración

$$L_f(m/KW) = \frac{0.001 * \left(\frac{COP_f - 1}{COP_f}\right) * (R_p + R_s * F_f)}{T_{max} - EWT_{max}}$$

siendo

L_c = Longitud de intercambiador necesario por cada KW de capacidad de la bomba de calor en modo calefacción a la temperatura mínima del subsuelo.

L_f = Longitud de intercambiador necesario por cada KW de capacidad de la bomba de calor en modo refrigeración a la temperatura mínima del subsuelo.

COP_c = Coeficiente de transformación en modo calefacción a T_{min} .

R_p = Resistividad térmica de la tubería.

R_s = Resistividad térmica del subsuelo.

F_c = fracción de funcionamiento en modo calefacción.

F_f = Fracción de funcionamiento en modo refrigeración.

4.- RESULTADOS

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuadra en los terrenos del Campus Universitario de Vigo, en la parcela situada al Este de la C-536 Ourense – Puebla de Trives.

Se trata de un terreno integrado en el núcleo urbano (Barrio de As Lagoas) de la ciudad de Ourense que suma un total de 35213.78 m². La zona se delimita mediante un rectángulo de coordenadas U.T.M. (Huso 29):

$$X1 = 594120,30 \text{ m} \quad Y1 = 4688754,27 \text{ m}$$

$$X2 = 594526,59 \text{ m} \quad Y2 = 4688962,25 \text{ m}$$

En el área de estudio se reparten 9 edificaciones diferentes, que suman un total de 10 508 m² construidos. Las distintas zonas de aparcamiento suman un total de 3.534,17 m², restando un total de 20 188 m² de zonas verdes, estanque y paseos delimitados al norte por la Avenida Alfonso Rodríguez Castelao, al Sur y Oeste por la Calle Doctor Témes, y al Este por la Avenida Otero Pedrayo (PLANO 01 AREA DE ESTUDIO).

Tabla 01.- Distribución de superficies del área Oeste del Campus Sur.

SUPERFICIE TOTAL CAMPUS ESTE (OURENSE)	35.213,78
Invernadero	140,00
Pabellón I	1.151,01
Pabellón II	715,65
Pabellón III	633,53
Escola de gaitas	279,88
Edificio de Ferro	2.094,19
Edificio Politécnico	4.793,62
Edificio Administración	344,00
Edificio Actividades/banco	355,92
Parking	3.534,97
TOTAL CONSTRUIDO	14.042,77
SUPERFICIE TOTAL LIBRE	21.171,01

La altitud de la parcela se sitúa entre los 140 m.s.n.m. (Sur) y los 132 m.s.n.m. (Norte).

La presencia de las distintas edificaciones condiciona la distribución de las estaciones de medida en el área de estudio.

4.2 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Se han identificado 12 puntos de agua con valores de temperatura y conductividad anormalmente altos, localizados al NW de la zona de estudio en un radio de 1500 metros. Su localización exacta se muestra en el PLANO 02 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.

Tabla 02 Puntos de agua anómalos en el entorno

ID	NOMBRE	GRUPO	COORDENADAS U.T.M. (H-29)		COTA (m.s.n.m.)	T (°C)	COND. (µS/cm)	pH	TIPO
			X (m)	Y (m)					
1	MENDE OESTE	ST	595506,4	4689151,7	114,0	29,5	n.d.	n.d.	Manantial
2	MENDE ESTE	ST	595584,2	4689129,4	123,0	29,5	644	7,29	Manantial
3	CAMINO MENDE 1	IT	595732,0	4689122,1	115,0	17,5	164	n.d.	Manantial
4	ERMITA MENDE	IT	595753,5	4689128,7	115,0	17,0	214	n.d.	Manantial
5	CAMINO MENDE 2	IT	595812,1	4689157,0	119,0	17,1	249	n.d.	Pozo
6	CAMINO MENDE 3	IT	595820,3	4689144,7	121,0	17,1	214	n.d.	Pozo
7	RUA DAS AUGAS 1	ST	595523,6	4689176,2	111,0	22,5	758	n.d.	Sondeo
8	CALLE DE LA ROCHA 1	ST	594808,4	4689074,6	115,0	18,7	401	7,60	Sondeo
9	CAMINO MENDE 4	ST	595828,1	4689151,6	122,0	21,7	331	n.d.	Manantial
10	CALLE PRADO LONIA 1	IT	594965,9	4688979,6	131,0	17,4	385	n.d.	Pozo
11	CALLE PRADO LONIA 2	IT	595025,1	4688976,4	131,0	16,1	516	n.d.	Pozo
12	RUA BAMIO 1	IT	595132,2	4689013,2	131,0	18,1	327	n.d.	Pozo

IT : Indicios de termalidad; ST : Surgencia termal

Los datos muestran como existen puntos en el entorno con valores de conductividad de 644 y 758 µS/cm, semejantes a los obtenidos en otras manifestaciones termales de la ciudad. Además, cuatro de los manantiales superan la temperatura mínima de afloramiento de 18,5 °C, que se sitúa como límite inferior para la declaración de agua termal en la ciudad de Ourense (1, 2, 7 y 9). Los manantiales 1 y 2 fueron aprovechados como balneario hasta finales de los años ochenta.

Las fichas individuales de cada punto catalogado se muestran en las siguientes páginas (1 a 12).

4.3 GEOLOGÍA Y TECTÓNICA

Geología

La zona de estudio corresponde a los terrenos en los que se localiza el Campus Sur en la ciudad de Ourense. El área es muy restringida, condicionada al objeto de estudio. Macroscópicamente se inscribe geológicamente en el Macizo Hercínico, y más

concretamente en la denominada Zona de Galicia-Tràs-os-Montes. Si bien este es el marco general, no podemos obviar la repercusión que ha tenido en el área la tectónica alpina y la acción fluvial del río Miño con una cuenca de drenaje superior a los 12.000 km².

La reactivación en tiempos alpinos de la fracturación hercínica y la generación de nuevas estructuras ha provocado la formación de una seudocuenca de orientación NE-SW, con grandes fracturas de desgarre retrabajadas por la acción morfológica de las redes fluviales que componen los ríos Miño-Lonia-Barbaña, los cuales confluyen geográficamente en la ciudad de Ourense conformando su valle y determinando la sedimentación de tres niveles de terrazas, correspondientes a diferentes épocas geológicas.



Fig. 20.- Nivel superior y vertientes en Ourense

Orlando esta “hoya” se encuentra un superficie estructural a una cota, por término medio de 340 metros la cual se conecta a la zona de fondo de valle a través de fuertes

vertientes (Figura 20), y produciéndose al pie de ellas la sedimentación de los diferentes escalones de terrazas desde los 145 metros hasta los 100 metros que representa el cauce del río Miño que indicaría su nivel base en este punto.

La extensión principal es ocupada por rocas cristalinas de naturaleza granítica con relictos de materiales metamórficos y tapizado el conjunto de forma dispersa por los depósitos fluviales y por materiales coluvionares producto de la dinámica de vertientes, en puntos muy localizados y de escasa extensión.

El material granítico que conforma el sustrato geológico corresponde a Granodioritas Biotíticas (Figura 21) que pertenecen al grupo de los granitoides calcoalcalinos y subalcalinos. Esta granodiorita, de grano grueso porfídico y textura inequigranular con gran densidad y tamaño de megacristales, constituye el extremo norte del Macizo de Orense, área en la que se encuentra la zona de estudio, presentando un marcado carácter intrusivo en los Esquistos Infraordovícicos y en los Granitos de Dos Micas, creando una importante aureola de metamorfismo de contacto con bordes netos y definidos y que afloran en la margen derecha del río Miño.

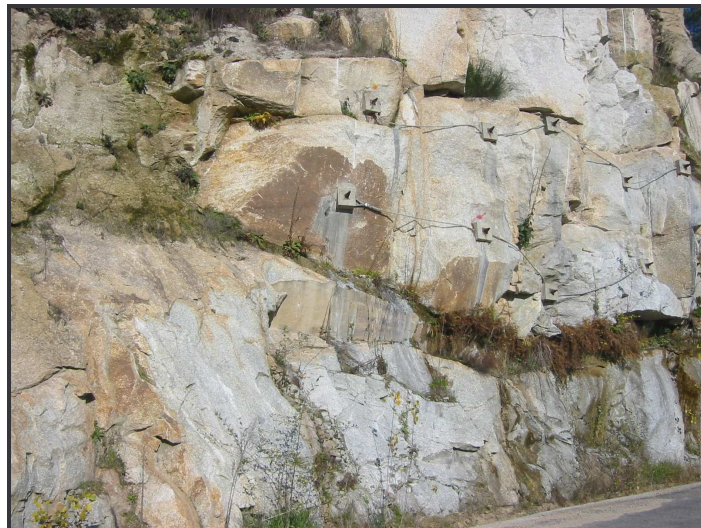


Fig. 21.- Aspecto que presentan las Granodioritas en zonas próximas al área de estudio

Los Granitos de Dos Micas constituye el otro gran grupo de granitoides con una gran presencia de cuarzo y un bajo grado de alteración lo que los hace muy resistentes a la meteorización. Dentro de este cuerpo aparecen pequeños afloramientos de material esquistoso, muy micaceos y cuarcíticos. Ambos materiales cristalino no se encuentran aflorantes en este margen del río.

Dada la morfología que presenta la “hoya” de Ourense, con un importante incremento en la sección del río Miño consecuencia de de la captura por su margen izquierda de sus afluentes Lonia y Barbaña en relación con su sección aguas arriba, se favorece la deposición de materiales fluviales en diferentes niveles y escalonados con una potencia media entorno a los 5 metros (Figura 22). Aunque estos materiales han sido retrabajados posteriormente aun se conservan retazos de gran extensión como es el caso del Campus Sur, si bien en sus obras de acondicionamiento parte de estos materiales han sido ya excavados y retirados. En conjunto forman un material conglomerático con cantos redondeados principalmente de cuarcitas, de hasta 30 centímetros de eje, englobados en una matriz areno-arcillosa y de tonos ocre.



Fig. 22.- Tercer nivel de Terrazas correspondiente al Campus de Ourense

Fracturación

Como se comentó anteriormente, la zona de estudio se inscribe en una “hoya” de carácter tectónico con su eje mayor macroorientado en sentido NE-SW.

Este graben tectónico se encuentra limitado por fracturas N 35° E de desgarro y reactivadas en tiempos recientes que condicionan, en parte, el desarrollo del cauce del río Miño y la morfología en escalones sobre los que se asienta la ciudad de Ourense con un fuerte contraste morfológico entre esta y su entorno.

Asociadas a esta dirección principal aparecen otras de menor extensión y desarrollo pero muy repetitivas, como las fracturas N 5° E, N 60° E y N 120° E. El papel que juegan este set de fracturas en relación con los fluidos termales no es el mismo. Las mencionadas en primer lugar son fracturas que resuelven las tensiones de un estado compresivo. Si bien la N 120° E es una fractura con gran representación en el área y que correspondería a un estado distensivo, favorable a la circulación y alumbramiento de los fluidos hidrotermales.

La actividad tectónica perdura, con diferentes impulsos, hasta tiempos geológicos recientes. Determinas morfologías, como en la zona de Eirasvedras al Oeste del área de estudio, dan una clara apariencia de esa actividad, si bien esta queda constatada y confirmada al observar niveles de terrazas claramente basculados, con direcciones y sentido acordes al estado tensional del conjunto (Figura 4) y que confirmarían otras observaciones, quizás no tan claras, de terrazas tectonizadas en la zona termal de Laias (Cid et al, 2006 Anexo I).



Fig. 23.- Tercer nivel de terrazas con basculamiento hacia el NE

4.4 TERMOMETRÍA DEL SUELO A 50 CM DE PROFUNDIDAD

El valor más común de flujo de calor conductivo en la corteza continental varía entre 40 y 70 W/m². Esto produce gradientes de temperatura de 20 a 35 °C/km, asumiendo una conductividad térmica de 2 W/m*K. Sin embargo, en la práctica se encuentran regiones que superan estos valores normales dando lugar a campos geotérmicos de alta, media y baja temperatura.

El flujo de calor en horizontes superficiales (0-3 m) esta condicionado por la incidencia solar. Así, si medimos la temperatura de un suelo a diferentes horas del día y de la noche, su gráfica resultará semejante a la oscilación térmica del ambiente, con un cierto retraso a medida que profundizamos en el terreno. Esto provoca una oscilación térmica subsuperficial cuyo valor se irá atenuando a medida que profundizamos. A 8-10

m. de profundidad, las oscilaciones térmicas superficiales prácticamente ya no tienen reflejo.

El estudio de un campo geotérmico de baja temperatura trata de determinar aquellas áreas cuyo flujo de calor sea anormalmente elevado. Este flujo puede tener 2 orígenes: conductivo debido a la transferencia de calor a través de las diferentes litologías; convectivo debido a flujos de agua subterránea cuyo recorrido subvertical ha permitido que alcancen altas temperaturas (40-60 °C), y circulan por estratos no muy profundos.

El análisis de temperaturas a 50 cm de profundidad se enfoca con el objetivo de determinar zonas con valores de temperatura en el suelo superiores al entorno, lo cual es un indicio de un flujo alto de calor. Cabe señalar que los horizontes superficiales (terrazas fluviales en el caso del Campus de Ourense) disipan y enmascaran la distribución de calor del substrato cristalino, a pesar de lo cual, a 50 cm de profundidad ya es posible detectar anomalías geotérmicas por su contraste de temperatura con el entorno.

Se han realizado 50 estaciones de medida de temperatura del subsuelo a 50 cm de profundidad en los terrenos del Campus de Ourense (PLANO 04 TERMOMETRÍA).

La distribución de las estaciones de medida se diseñó para poder cubrir todo el área equidistantemente, salvando los obstáculos físicos presentes en la misma (edificaciones, paseos, estanque, invernadero...).

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro digital marca XS con una precisión de ± 0.1 °C y una sonda PT-100 de 50 cm de profundidad y 1.2 cm de

diámetro. Los agujeros de medida se realizaron por percusión (se ha evitado el uso de medios mecánicos porque distorsionan la temperatura del suelo al generar calor), con un diámetro de 1.8 cm. Y una profundidad de 55 cm. Después de su apertura, se introdujo la sonda PT-100, taponando la parte superior del hoyo con una plancha de poliestireno para evitar la entrada de aire ambiente que pudiera alterar la medida. La medición efectuada se realizó una vez estabilizada la temperatura en el lector, durante un tiempo no inferior a 2 minutos.

Al mismo tiempo que se realizaban las mediciones, con otro termómetro similar y una sonda de superficie se tomaran las temperaturas ambiente de la hora que se realizaba la lectura del suelo, con el fin de poder comparar estos valores y poder ajustar la influencia de la radiación solar en la temperatura del suelo.

El mapeado de las temperaturas del suelo a 50 cm se puede observar en el Plano 04 TERMOMETRÍA.

Los valores obtenidos oscilan entre un mínimo de 14.2 °C y un máximo de 18.8 °C (4.6 °C de diferencia en un área de 3.5 Ha). Dada cuenta que la realización de las mediciones se realizó secuencialmente en un intervalo de 2 horas en la misma franja horaria de 3 días diferentes para poder comparar los valores independientemente de la temperatura ambiente exterior, los resultados obtenidos aportan una prueba más de la extrema variabilidad térmica del subsuelo del Campus, con flujos de calor no homogéneos y muy relacionados a la estructura tectónica de fracturas que cuarteán el substrato granítico sub-superficial.

4.5 CONCENTRACIÓN DE CO₂ EN EL SUBSUELO

El flujo de CO₂ en el suelo ha sido usado durante años para la caracterización de sistemas geotérmicos, fundamentalmente en alta entalpía (*Chiodini, 1994; Chiodini et al., 1995, Mahon et al., 1980*). El flujo de CO₂ es un indicador de la permeabilidad sub-superficial lo que permite su uso como herramienta de prospección de reservorios geotérmicos de diferentes temperaturas.

El tamaño actual de los equipos que permiten medir la concentración de CO₂ en una cámara definida, combinado con el uso de ordenadores portátiles permiten construir un equipo móvil que facilita la obtención de datos de múltiples puntos de un área geotérmica.

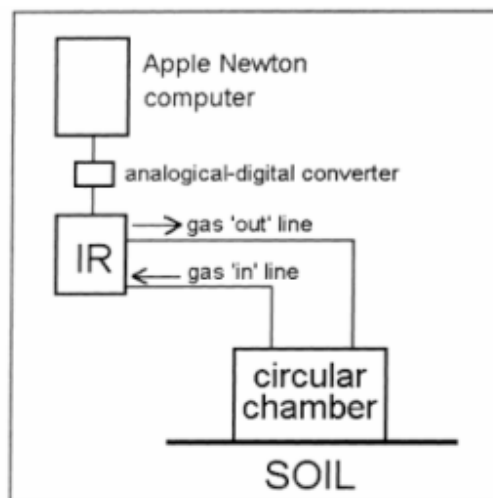


Fig. 24.- Equipo móvil para la medición de CO₂ en el suelo [*Chiodini et al., 1998*]

Los excelentes resultados obtenidos con estas técnicas en la caracterización de sistemas geotérmicos de alta temperatura de origen volcánico, nos ha llevado a plantear el uso de los mismos en sistemas fisurales de media-baja temperatura (sistema Ourense-Ciudad). El mapeado de esta variable del suelo puede constituirse como una herramienta de investigación importante, dada cuenta que la composición bicarbonatada y

carbonatada de las aguas del NW de España (aguas termales) deben aumentar el flujo de CO_2 en aquellas direcciones por las que circule el agua termal subsuperficial.

Se han realizado 50 estaciones de medición de CO_2 en el suelo e el área del Campus Sur de la Universidad de Vigo mediante la utilización de un equipo autónomo de medición de CO_2 en el suelo (LICOR 810). La distribución de las estaciones de medida se realizó homogéneamente en el área de estudio dentro de las áreas de suelo vegetal disponible e la misma.

Para la medición de la temperatura ambiente se utilizó un termómetro con sonda PT-100 y los datos de presión atmosférica local se tomaron de la estación climatológica situada en la azotea del Edificio Politécnico, dentro de los terrenos del propio Campus.

Los valores extremos fueron realizados por duplicado en diferentes días, obteniendo medidas similares.



Fig. 25.- Toma de medidas en campo (Junio 2007)

Los datos de campo obtenidos y convertidos a valores de $\text{g CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{día}$ de acuerdo con los cálculos anteriores se muestran en el PLANO 05 FLUJO DE CO_2 . Se ha realizado una interpolación por el método de Kriging del resto del área de estudio. El valor homogéneo más común es una concentración entre 5 y 10 $\text{g CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{día}$, sin embargo, se observa como en la zona Este se alcanzan puntos con valores entre 40-50 $\text{g CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{día}$ lo que significa multiplicar por 4-5 el valor más representativo del área de estudio.

Si comparamos los valores de CO_2 con los obtenidos en la termometría superficial se comprueba que ambos presentan sus máximos asociados a las alineaciones de fracturación señaladas e el PLANO 03, lo cual nos lleva a pensar esta técnica obtiene también buenos resultados en yacimientos fisurales, marcando máximos de concentración de flujo en el suelo asociados a la circulación subsuperficial de agua termal.

4.6 CONCENTRACIÓN DE Rn^{222} EN EL SUBSUELO

Radon²²² es un gas radioactivo que se libera por la desintegración natural del Thorio y el Uranio. Este proceso se produce de manera natural en las rocas y el suelo. Se trata de un gas inoloro, invisible e insipido por lo que el Rn^{222} no puede ser detectado por los sentidos humanos.

Rn^{222} se desintegra en 2 elementos radioactivos (Polonio²¹⁸ y Polonio²¹⁴) que son emisores de partículas alfa, las cuales pueden causar daños en tejidos vivos.

La concentración de Rn^{222} ha sido realizada por diferentes investigadores en todo el mundo, principalmente en estudios sobre edificios y materiales de construcción (*Tufail*

et al., 2000; Abumurad et al., 1997; Abumurad and Al-Tamimi, 2001; Al-Jarallah, 2001 ; Jönsson et al., 1999; Sroor et al., 2001).

Es conocida la alta concentración de los substratos graníticos en isótopos radioactivos lo que los convierte en un foco importante de emisiones de Rn a la atmósfera. Asimismo, las técnicas constructivas habituales en el NW de España emplean mucho este material en fachadas y estructuras. El granito era el material base de la mayoría de las viviendas unifamiliares de Galicia, dada cuenta que era un material barato y existía un importante gremio profesional de reconocido prestigio que lo trabajaba.

Es por ello que dentro de este trabajo de maestría se nos presentó la oportunidad de medir concentraciones de Rn²²² en el suelo del Campus de Ourense, trabajo del cual no existen referencias anteriores referidas a territorio gallego. Los resultados obtenidos se añadirán a los otros estudios realizados, al objeto de evaluar si las zonas graníticas fracturadas (con mayores emisiones de Rn²²²) son identificables mediante la medición del flujo de Rn²²² en horizontes superficiales.

Se han realizado 50 estaciones de medición de Rn²²² en el suelo en el área de estudio mediante la utilización de un equipo PYLON de contabilización de centelleos. La distribución de las estaciones de medida se realizó homogéneamente en el área de estudio dentro de las áreas de suelo vegetal disponibles en la misma.

Para la medición de la temperatura ambiente se utilizó un termómetro XS con sonda PT-100.

Los valores extremos fueron realizados por duplicado en diferentes días, obteniendo medidas similares.

Los datos de campo obtenidos y convertidos a valores de pCu/L se muestran en el PLANO 06 CONCENTRACIÓN DE Rn²²². Se ha realizado una interpolación por el método de Kriging del resto del área de estudio. El valor homogéneo más común es una concentración entre 38 y 104 pCu/L, con picos de 145-186 pCu/L

Si bien se trata de valores altos, su interpolación y representación no muestran con claridad una tendencia o alineación asociable a las direcciones estructurales. La base cristalina granítica existente en todo el Campus, eleva la concentración media de este isótopo en los gases del suelo pero la limitación de espacio por la presencia de edificaciones y la urbanización del entorno impide conocer si dichos máximos tienen continuidad en áreas aledañas a los terrenos del Campus.

4.7 SONDEO DE PROSPECCIÓN GEOTÉRMICA

El 7 de Septiembre de 2007 se inició la perforación de un sondeo de prospección de 130 m. de profundidad con el objetivo de reconocer las características propias del subsuelo del Campus. Los trabajos previos señalaron diferentes indicios de anomalías geotérmicas si bien es necesario corroborarlas y obtener los parámetros de diseño (TES, tipo de subsuelo) necesarios para diseñar de manera óptima la solución geotérmica.

El sondeo de investigación se realizó con un diámetro de 160 mm por el método de rotoperCUSión, si bien se debieron perforar los primeros 15 metros mediante martillo

Odex y entubado en acero debido a que el terreno hasta esta profundidad no estaba consolidado.



Fig. 26.- Perforación del sondeo de investigación en el Campus de Ourense (Septiembre 2007)

Se realizó un seguimiento de la perforación recogiendo muestras de ripios cada 3 metros de profundidad para su posterior identificación en laboratorio y elaboración de la columna estratigráfica. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

COLUMNA LITOLÓGICA SONDEO CAMPUS SUR		
0		
3	Material conglomerático con cantos de cuarzo, micas y feldespato. Estructura de suelo	
6	Conglomerado con cantos seudoredondeados de cuarzo y presencia de arena con dos micas. Hacia la base aumenta el tamaño de los fragmentos y se hacen más cuarcíticos	
9	Granito de dos mica con tonos blanquecinos.	Presencia de diques de
25		
28	Granito de dos mica con mayor presencia de feldespatos y tonos ocres	
31		
34		Esporádica presencia de alteraciones de Fe
40		Minerales oxidos de Fe
43		Oxidaciones en granos de cuarzo
46		Granos de cuarzo
73		Granos de cuarzo y micas con oxidación
76	Granito de dos mica con tonos blanquecinos y grano	
79		
82	Granito de dos mica con tonos blanquecinos.	Biotitas alteraciones de
91		Feldespatos algo alterados
94	Granito de dos micas con cuarzros rosados	Presencia de
97		fracturación
106		
109	Granito de dos micas con cuarzros rosado. Tamaño de granos pegmatíticos	
112		
115	Granito de dos mica con tonos blanquecinos.	
118	Granito con presencia de Biotita	
121		
124	Granito de dos mica con tonos blanquecinos.	Presencia de pequeños diques de Cuarzo
127		
130		

Fig. 27.- Columna estratigráfica del sondeo de investigación en el Campus de Ourense

4.8 EVOLUCIÓN TÉRMICA E HIDROLÓGICA DEL SONDEO DE PROSPECCIÓN

Finalizada la perforación, y previo a su instrumentalización con tubería de PE, se realizó un seguimiento de temperaturas y nivel freático al objeto de determinar la columna de temperaturas del pozo y la evolución del nivel freático en el mismo.

El análisis de temperaturas se realizó introduciendo una sonda SOLINST de registro autónomo has el fondo del pozo, así como se obtuvieron datos de la evolución térmica de los 25 primeros metros de columna mediante un termómetro con sonda Pt-100 durante los 15 días inmediatamente posteriores a la finalización de la perforación.

Los resultados obtenidos fueron lo siguientes:

a) Evolución térmica de los primeros 25 m. de columna

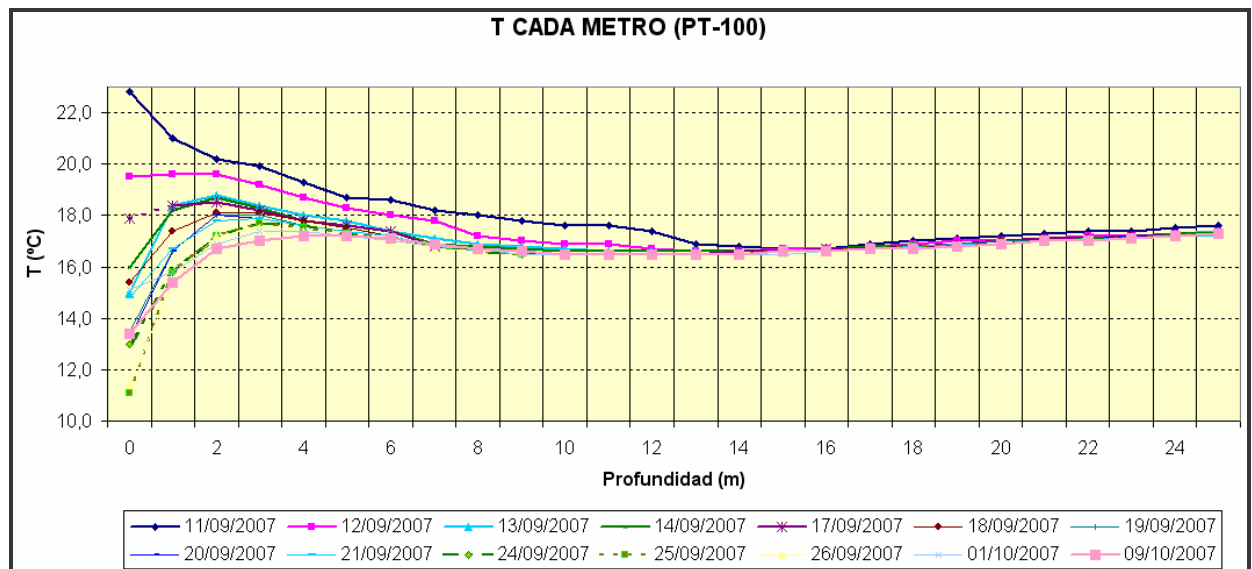


Fig. 28.- Evolución de temperaturas de los primeros 25 m de pozo

b) Evolución hidrológica del sondeo

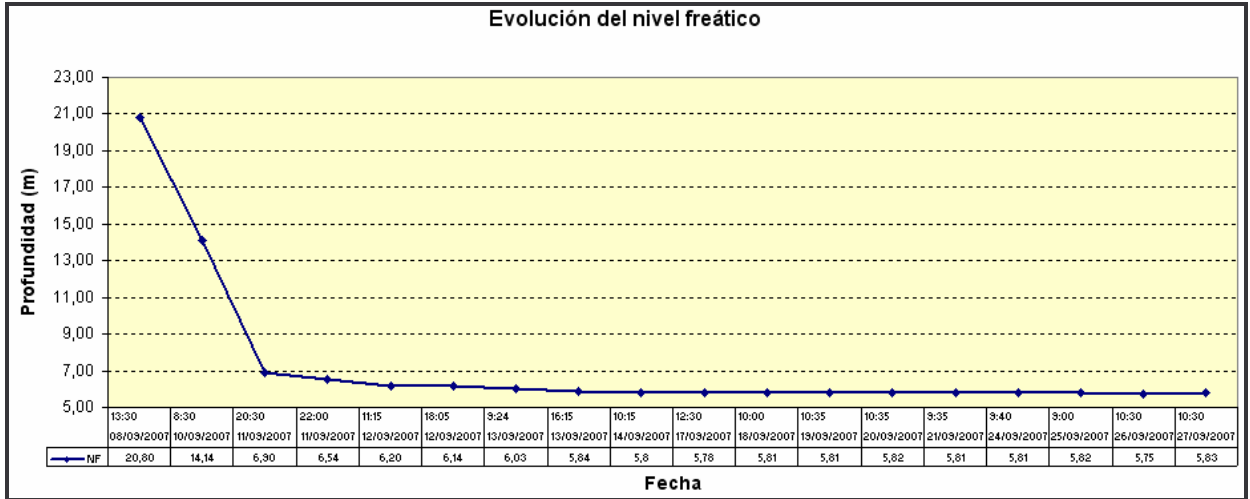


Fig. 29.- Evolución del nivel freático

c) Gradiente de temperaturas de la columna del pozo

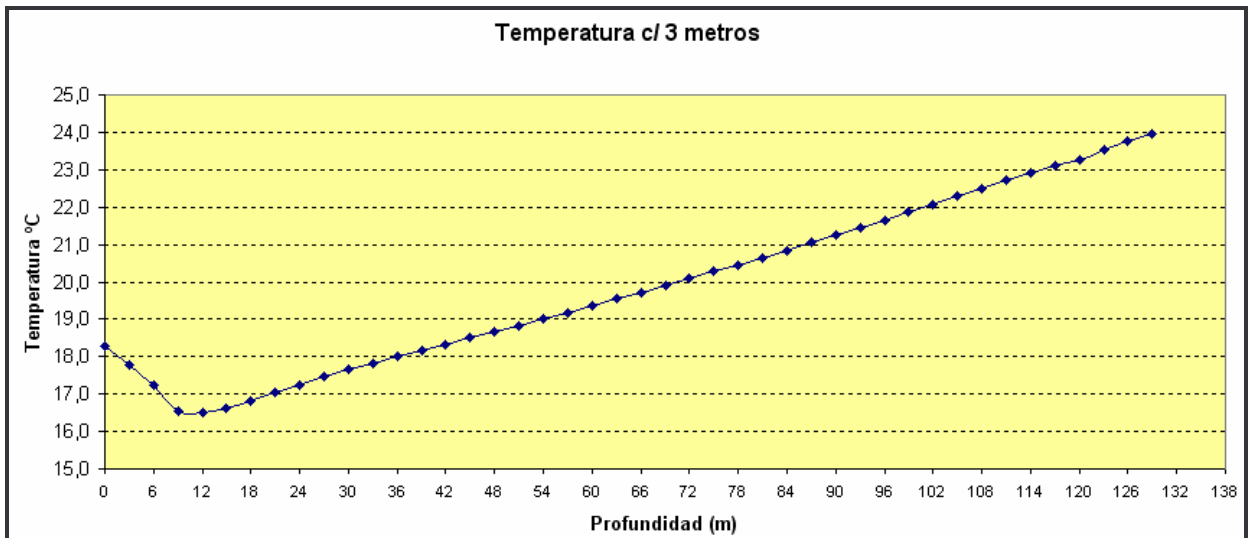


Fig. 30.- Temperatura cada 3 metros del pozo de investigación

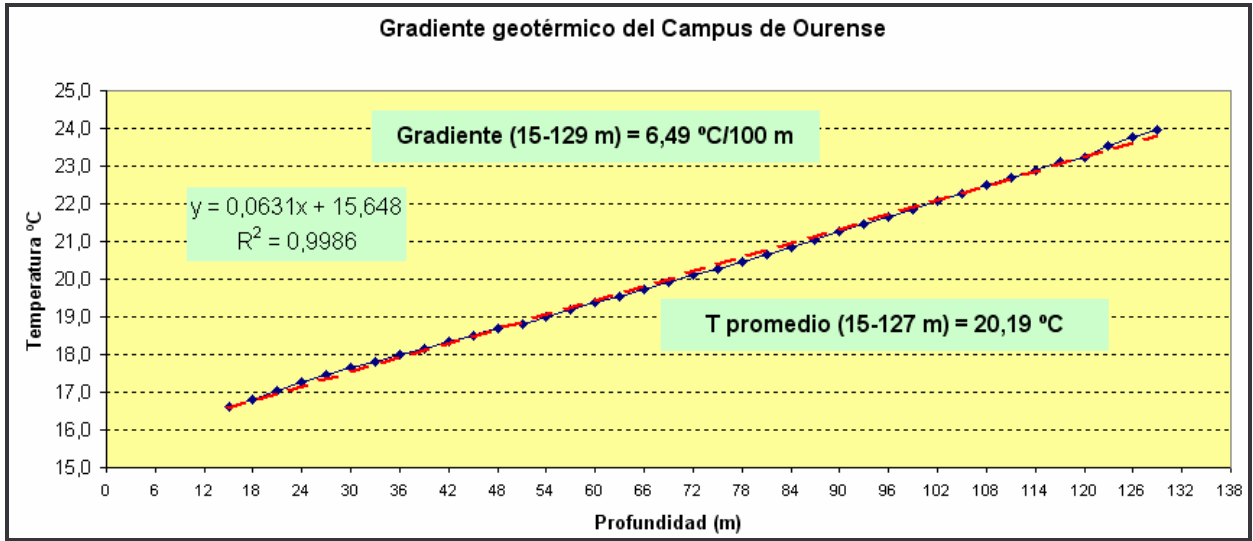


Fig. 31.- Gradiente geotérmico del Campus de Ourense

4.9 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN GEOTÉRMICA

Cargas Térmicas

Localización: Ourense, NW España

Temperatura mínima de diseño exterior: -3 °C

Temperatura máxima de diseño exterior: 35 °C

Cargas térmicas de calefacción: 40 KW

Cargas Térmicas de refrigeración: 35 KW

	<i>Pérdidas (kW)</i>	<i>Ganancias (kW)</i>
8:00-12:00	37.9	18.2
12:00-16:00	30	32
16:00-20:00	39.6	28
20:00-8:00	0	0
Nº equivalente de horas a carga total	1500	540
Numero de días de utilización a la semana	5	5

Bomba de calor

Modelo:Terra 45S

► Modo calefacción

<i>EWT mínima (°C)</i>	<i>*T.E.S media (°C)</i>	<i>Período de modelado</i>
0	19 °C	10 años

► Modo refrigeración

<i>EWT máxima (°C)</i>	<i>*T.E.S media (°C)</i>	<i>Período de modelado</i>
38	19 °C	10 años

Datos técnicos

<i>Potencia nominal</i>	<i>Consumo eléctrico</i>	<i>COP</i>	<i>Caudal</i>	<i>Perdida de carga</i>
45.50 kW	10.33 kW	4.4	146.6 L/min	28 kPa

Según EN 14511

Datos de diseño

	<i>Calefacción</i>	<i>Refrigeración</i>
<i>Tª entrada a bomba de calor</i>	5	30
<i>Flujo</i>	146.6 L/min	140 L/min

Reconocimiento litológico

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Litología</i>
0-15	Conglomerado de arenas y arcillas
15-130	Granito con diferentes estados de fracturación (>25% cuarzo)
Nivel Freático	5.3 m

<i>Propiedades del subsuelo</i>	
T.E.S.	19 °C
Conductividad térmica	4.5 W/mK
Difusividad térmica	0.120 m ² /día

Tubería y configuración de campo

<i>Configuración</i>	Vertical
<i>Patrón</i>	1 x 3
<i>Total de pozos</i>	3
<i>Diámetro de pozos</i>	160 mm
<i>Circuitos</i>	(6) x 32 mm
<i>Espaciado entre pozos</i>	5 m
<i>Número de pozos por loop paralelo</i>	1
<i>Relleno de los pozos</i>	Solo 30 m superficiales
<i>Lechada</i>	Bentonita/cemento, 1.65 W/mK
<i>Resistividad térmica del relleno</i>	0.092 m ² K/W
<i>Tipo de tubería</i>	HDPE
<i>Diámetro de tubería</i>	26/32 mm
<i>Cabezales</i>	2 x 42 mm
<i>Flujo máximo</i>	146.6 L/min
<i>Fluido de intercambio</i>	Agua
<i>Conexiones</i>	Termofusión

Resultados

<i>Modo de diseño dominante</i>	calefacción
<i>Longitud total necesaria</i>	376.2 m
<i>Número de perforaciones</i>	3
<i>Longitud de perforación</i>	125.4
<i>Cambio de T^a del subsuelo (10 años)</i>	-0.3 °C
<i>COP sistema</i>	3.7
<i>Flujo</i>	129.2 L/min
<i>Calor extraído por m de pozo</i>	88.06 W/m

Evaluación económica

Se valora económicamente el coste de instalación del sistema de intercambio geotérmico y bomba de calor, dada cuenta que el sistema de distribución interna de calor es similar para cualquier sistema de climatización alternativo.

Coste de instalación

1. POZOS DE INTERCAMBIO GEOTERMICO	
Sistema de intercambio geotérmico (380 x 160 mm) incluida perforación en rotoperCUSión, Instrumentalización en doble-U 1', sellado y dirección facultativa	15 955,40
SUBTOTAL	15 955,40 €
2.- BOMBA DE CALOR, BOMBEO Y CONEXIONES DE CIRCUITOS	
Bomba de Calor Agua-Aire Cap = 45.42 kW, ACS, regulación y puesta en marcha	14220
1 Deposito de inercia calor/fríoario 25 L/min	4628
Conexiones, Ud bombeo, válvulas de control, purgado	1720
SUBTOTAL	20568,00 €
2.- PROYECTO Y DIRECCION DE EJECUCIÓN	
Dirección de ejecución	1 535,77
SUBTOTAL	1 535,77 €
TOTAL COSTE DE EJECUCIÓN MATERIAL (SIN IVA)	38059,17 €

Coste de operación de la solución geotérmica► **Bomba de circulación**

Bomba de circulación	8.8 m ³ /h @ 9.4 mca
Temperatura de operación	-7 a 40 °C
Estimación de consumo	330 W
<i>Precio kWh = 0.082 €/kWh</i>	
Calefacción	Refrigeración
1050 horas	324 horas
28.43 €	8.76 €
Total gasto anual bomba de circulación (x 1.2)= 44.62 €	

<i>Capacidad Nominal Calefacción</i>	45.40 kW @ 0°C EWT
<i>COP (EN 14511)</i>	4.4
<i>Potencia consumida 5/40°C</i>	10.33 kW
<i>Precio kWh = 0.082 €/kWh</i>	
<i>Gasto eléctrico con la bomba a carga total</i>	
Calefacción	Refrigeración
1050 horas	324 horas
889.40 €	273.65 €
Total gasto anual en climatización = 1163.05 €	

Coste de operación anual del sistema geotérmico = 1212.13 €/año

Coste de operación del sistema actual

En la actualidad, la edificación se encuentra climatizada mediante una bomba de calor aire-aire marca ROCA de 40 KW de capacidad térmica en calefacción, con un COP nominal en condiciones de diseño de 2.1. De acuerdo a los datos de consumo eléctrico anual aportados por la gerencia del Campus de Ourense (periodo 2000-2005), el gasto eléctrico anual (frío/calor) del sistema de climatización actual es de 2621.30 €/año.

Cuadro comparativo

	Geotérmico	Bomba Calor aire-aire
Coste de instalación ¹ €	38057,17	16228,32
Coste de operación (€/año)	1213,13	2621,30
Vida útil	25 años	25 años
Consumo energético anual (kWh/año)	10795.68	29504.76
Emisiones de CO2 (Tn CO ₂ /año)	5343	14598

1 El sistema de distribución interno de calor es el mismo para ambos sistemas

5.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se realiza la comparación de una solución geotérmica de climatización frío/calor con un sistema de climatización con bomba de calor aire/aire. Señalar que los sistemas aire/aire son uno de los más eficientes actualmente en el mercado (COP 2-2.5) muy por encima de los sistemas eléctricos (COP 1) o calderas de gasoil o gas natural (COP 0.85-0.95).

Respecto al coste de instalación, el sistema geotérmico duplica el precio del sistema aire-aire, si bien se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En condiciones climatológicas exteriores extremas (Temperatura $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$), el sistema de climatización aire-aire se bloquea, debiendo disponer de un sistema auxiliar que supla las necesidades térmicas en estas condiciones el cual no está valorado económicamente. En el caso de la solución geotérmica, este inconveniente no sucede.
- Las condiciones de humedad del aire exterior en la ciudad de Ourense rondan valores medios del 70-80%, lo que merma la eficiencia del sistema aire-aire. En verano, el sistema condensa agua y no produce frío incluso con temperaturas exteriores no demasiado altas.

La solución geotérmica reduce un 54% el coste de operación respecto al sistema más eficiente del mercado. La reducción en el consumo energético es del 63.4% para las mismas horas de operación. Asimismo, se produce una reducción en el mismo porcentaje de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Los costes de perforación en España representan de momento un obstáculo para el desarrollo de las soluciones geotérmicas, si bien, este tipo de sistemas cuentan con ayudas institucionales de hasta un 40% (valor medio 2004-2006 32.5%) del coste de instalación por ahorro energético y uso de energías renovables lo que representaría en el presente caso un ahorro de 12350 €. La solución geotérmica resultaría un 38% más cara que una solución aire-aire, si bien esta última necesitaría de un sistema de apoyo para condiciones extremas si se quiere disponer de climatización continua durante todo el año.

Las condiciones hidrogeológicas del Campus de Ourense muestran una litología principal granítica "fértil", es decir, con un flujo de calor que duplica los valores normales de la región. Se ha obtenido un gradiente de 6.5 °C/km con una temperatura estable de la columna del pozo de intercambio de 19 °C, lo que lo sitúa 4 °C por encima de otras regiones del Norte de España, y un gradiente que duplica el valor normal comprobado en otros pozos de la provincia de Ourense. Una solución geotérmica en terrenos del Campus requiere un 48% menos de longitud de pozo de intercambio para cubrir las mismas necesidades térmicas superficiales debido a las anomalías en el flujo de calor descubiertas. Dada cuenta que los costes de perforación son el gasto principal en este tipo de sistemas, el Campus de Ourense posee uno de los mejores substratos para la implantación de los mismos.

La solución geotérmica representa un ahorro anual en coste de operación de 1300 €/año (se ha de tener en cuenta que es un edificio publico con solamente 8 horas de utilización diarias). Si se tienen en cuenta las ayudas públicas, el sobrecoste de instalación se amortizaría en 7.4 años respecto a una bomba de calor aire-aire sin sistema

auxiliar. Respecto a sistemas de gasoil o eléctricos, esta cifra se reduciría a menos de la mitad.

6.- CONCLUSIONES

Las soluciones geotérmicas representan una alternativa eficiente, sostenible y económicamente rentables para la climatización de espacios en el NW de España. A pesar de que suponen un desembolso inicial de entre un 40-60 % superior a los sistemas convencionales, las ayudas institucionales y la no necesidad de disponer de sistemas auxiliares, permiten plazos de amortización de la inversión de entre 7 y 10 años.

La provincia de Ourense (NW de España) es una región con diferentes anomalías geotérmicas de origen fisural, lo que provoca flujos de calor anormalmente altos en el subsuelo. El Campus de Ourense se asienta dentro de uno de estos sistemas geotérmicos de media-baja temperatura, con gradientes que duplican los valores normales de la zona. Si bien estos valores no son suficientes para pensar en un uso directo del calor subterráneo (temperaturas de 20 °C), si maximizan la eficiencia de soluciones geotérmicas mediante bomba de calor.

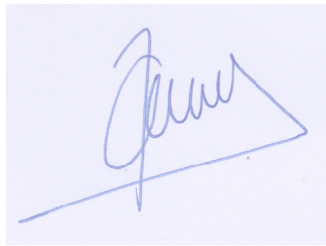
El mayor obstáculo para el desarrollo de la tecnología de geotermia de baja temperatura en España son los elevados costes de perforación y la falta de profesionales cualificados en el diseño de los pozos geotérmicos. Es necesario un conocimiento profundo del subsuelo para adaptar los sistemas a las litologías locales, que, en general, producen un flujo de calor superior a la de otras regiones europeas.

El diseño de una solución geotérmica debe estar completamente asociado a un estudio profundo del medio físico donde se ha de ubicar. En el caso del Campus de Ourense, tomando valores de las propiedades del subsuelo empíricos, se sobredimensionaría el sistema de intercambio geotérmico en un 40% (con un 40% más de costes de

instalación). La experiencia desarrollada en Ourense demuestra que la inversión inicial en el estudio del subsuelo se amortiza completamente por los ahorros producidos en el diseño del mismo.

En Mexicali, BC a 22 de Diciembre de 2007

El autor de la tesis



José Ángel Cid Fernández

Maestría en Ciencias e Ingeniería

Instituto de Ingeniería

UABC

7.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Euroobserv'er, 2005. *Le Baromètre géothermie*. Systèmes Solaires 170.
- [2] Comisión Europea, 1997. *Energía para el futuro: fuentes de energía renovables. Libro Blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios* COM(97) 599.
- [3] Mufler, P., Cataldi, R., 1978. *Methods for regional assessment of geothermal resources*. Geothermics 7, 53-89.
- [4] Lund, J.W., Freeston, D.H. and Boyd, T. L., 2005 *Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review*. Geothermics, 34, 691-627.
- [5] Sánchez-Guzmán, J., García de la Noceda-Márquez, C., 2005. *Geothermal energy development in Spain – country update report*. En: Procedimientos. WGC2005.
- [6] Instituto Geológico Minero de España IGME, 1980. Estudio Geotérmico de las Manifestaciones Termales de Galicia. Ministerio de Industria y Energía. Secretaria de la Energía y Recursos Minerales.
- [7] Instituto Geológico Minero de España IGME, 1982. *Investigación Geotérmica de Rocas Calientes Secas en la Zona Septentrional de la Provincia de Ourense*. Ministerio de Industria y Energía. Secretaria de la Energía y Recursos Minerales.
- [8] Instituto Geológico Minero de España IGME, 1984. *Investigación Geotérmica en dos Zonas de la Provincia de Ourense*. Ministerio de Industria y Energía. Secretaria de la Energía y Recursos Minerales.
- [9] Araujo Nespereira, P.A., 1988. *Hidrotermalismo y tectónica en el SE de Galicia (Provincia de Ourense)*. Xunta de Galicia. El Termalismo en Galicia en la década de los 80, pp. 33-54. Artes Gráficas Portela. Pontevedra.
- [10] Araujo Nespereira, P.A., 1989. *Termalismo en el área de Carballino (Ourense) y su relación con la tectónica*. Bol. Soc. Esp. Hidrol. Med. Vol. IV, nº3, pp. 113-116.
- [11] Araujo Nespereira, P.A., Cid Fernández, J.A., 1998. *Estudio hidrogeológico y prospección geofísica del yacimiento termal de Laias (Cenlle, Ourense, España)*. Proyecto de I+D para el Excmo. Ayuntamiento de Laias.
- [12] Cid Fernández, J.A., Araujo Nespereira, P.A., 2002. *Prospección eléctrica del yacimiento termal de Eirasvedras (Ourense, España)*. PFC Ingeniero Agrónomo. EPS Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.
- [13] Urchueguía, J., 2006. Geothermal Heat Pump for heating and cooling along European coastal areas. Proyecto GEOCOOL. Publishable version of final report. Instituto de Eficiencia Energética. Universidad Politécnica de Valencia.
- [14] Rybach, L., Hopkirk, R., 1995. Shallow and deep borehole heat exchangers—achievements and prospects. Proceedings World Geothermal Congress, Florence, pp. 2133–2139.
- [15] Rybach, L., Eugster, W.J., 1997. Borehole heat exchangers to tap shallow geothermal resources: The Swiss success story. S.F. Simmons, O.E. Morgan, M.G. Dunstall (Eds.), Proceedings of the 19th New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, pp. 63–69.
- [16] Claesson, J., Eskilson, P., 1988. Conductive heat extraction from a deep borehole. Thermal analysis and dimensioning rules. Energy 13/6, 509–527.

- [17] Eskilson, P., Claesson, J., 1988. Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer* 13, 149–165.
- [18] Sanner, B., 1986. Schwalbach Ground-Coupled Heat Pump (GCHP) Research Station. Newsletter IEA Heat Pump Centre 4/4, Karlsruhe, pp. 8–10.
- [19] Hellstrom, G., Sanner, B., Klugescheid, M., Gonka, T., Martensson, S., 1997. Experiences with the borehole heat exchanger software EED. Proceedings MEGASTOCK 97, Sapporo, pp. 247–252.
- [20] Spitler, J.D. 2000. GLHEPRO A design tool for commercial building ground loop heat exchangers, in: Proceedings of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Quebec.
- [21] Nagano, K., Katsura, T., Takeda, S., 2005. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 1578-1592
- [22] Gaia Geothermal, 2006. Ground Loop design 3.0.
- [23] Eklof C, Gehlin S. , 1996. TED A mobile equipment for thermal response test. Master's thesis 1996:198E. Sweden: Lulea University of Technology.
- [24] Austin, W., 1998. *Development of an In-situ System for measuring Ground Thermal Properties*. MS thesis, OSU, Stillwater OK.
- [25] Monasterio, R., P. Hernández J. y Saiz, 1993. La bomba de calor. Fundamentos, técnicas y aplicaciones. McGraw-Hill, Madrid – España.
- [26] Bose, J.E., 1984. Closed-Loop Ground-coupled Heat Pump Design Manual. Oklahoma State University, Engineering Technology Extension.
- [27] Kavanaugh, S. P.; Rafferty, K. 1997. Ground-Source Heat Pumps; Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- [28] Wu, J.; Nofziger, 1999. Incorporating temperature effects on pesticide degradation into a management model. *J. Environ. Qual.* 28:92-100.
- [29] Electric Power Research Institute EPRI, 1989. Soil and Rock Classification for the Design of Ground- Coupled Heat Pump Systems—Field Manual. Special Report, EPRI CU-6600.
- [30] Ingersoll, L.R., Plass, H.J., 1948. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *ASHVE Transactions* vol. 54 p. 339-348.
- [31] Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of heat in solids*. Second ed. Oxford University Press. Reino Unido.
- [32] Water-Source Heat Pump Engineering Committee, 2005.

8.- PLANOS

Plano 01 Área de Estudio

Plano 02 Inventario de Puntos de Agua

Plano 03 Litología y fracturación

Plano 04 Termometría del suelo a 50 cm de profundidad

Plano 05 Concentración de CO₂

Plano 06 Concentración de Rn222

Plano 07 Ubicación del pozo de investigación

9.- ANEXO I ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN

ENERGÍA & empresa


Revista empresarial del sector de la energía | Número 8. Marzo 2006
6 euros

**La energía eólica
vuela con nuevos aires**
Página 8

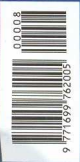
**La interconexión eléctrica
entre España y Francia**
Página 46

**Entrevista a Juan M.
Ormazábal Jordana,**
DIRECTOR GENERAL DEL CENER
Página 34

**Entrevista a M^a Teresa
Estevan Bolea,**
PRESIDENTA DEL CONSEJO
DE SEGURIDAD NUCLEAR
Página 6



GEOTERMIA
Calor desde el centro de la Tierra



ESPECIAL: ENERGÍA GEOTÉRMICA

Potencial geotérmico del noroeste peninsular español: Galicia

Nos referimos al término de yacimiento geotérmico cuando en una zona coexisten los siguientes factores: un volumen de roca con temperatura anormalmente elevada y que puede ser recorrido por una corriente de agua (propia o inyectada artificialmente) que pueda absorber calor y transportarlo a la superficie.

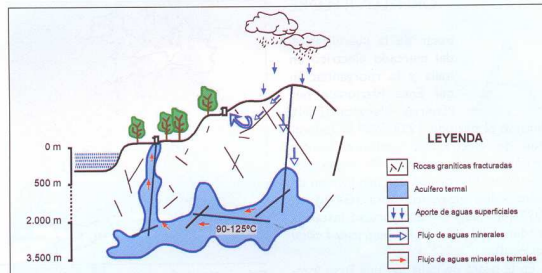
JOSÉ ÁNGEL CID FERNÁNDEZ
JAIME ALONSO REYES LÓPEZ
PEDRO A. ARAUJO NESPEREIRA

De acuerdo con la temperatura que el agua puede alcanzar en contacto con la roca caliente, los depósitos geotérmicos se dividen en dos tipos: de baja entalpía (cuando su temperatura es inferior a los 150°C) y de alta entalpía (con temperaturas de contacto superiores a 150°C). Así pues, cuando nos referimos a yacimiento geotérmico, consideramos que en el área geográfica en la que existe la anomalía, se cumplen las condiciones geológicas y económicas necesarias para que se pueda explotar la energía geotérmica del subsuelo, las cuales difieren según se trate de un yacimiento de alta o baja entalpía. Las condiciones geológicas para la existencia de un yacimiento geotérmico de baja entalpía es la existencia, a la profundidad adecuada (1,5-2,5 kilómetros), de formaciones geológicas permeables capaces de contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor a la roca.

Recursos geotérmicos gallegos

Los recursos geotérmicos técnica y económicamente explotables se localizan en las provincias de Lugo, Pontevedra y Ourense. Son recursos de baja y media entalpía con temperaturas que van de 50 a 140°C, con profundidades de almacén entre los 200 y los 1.500 m. Los depósitos geotérmicos gallegos poseen ciertas limitaciones que condicionan su aprovechamiento. Por una parte, la hidrogeología de la zona presenta muy pocas posibilidades, debido a la falta de porosidad de los materiales paleozoicos. Esto limita en gran medida la infiltración natural de las aguas y su almacenamiento en capas más profundas, traduciéndose en la práctica carencia de depósitos importantes, lo que obligaría, de querer explotarlos a gran escala, a la aplicación de técnicas de "roca seca caliente", que dificultaría y encarecería la explotación.

Otra consideración merecen los recursos geotérmicos que afloran en la superficie en forma de fuentes termales, en numerosos puntos de la geografía gallega. El agua termal gallega no es más que agua de origen meteórico que, aprovechando las fracturas del material que compone el substrato gallego, accede al interior



En el gráfico se aprecia el origen de los yacimientos geotérmicos gallegos.

terrestre, descendiendo hasta profundidades de 1.500-2.000 m y, debido al gradiente y la desintegración de isótopos, alcanza temperaturas de almacén de 100-125°C. Por las mismas vías de acceso, las fracturas, y debido a la presión del vapor de agua que se genera durante su calentamiento, asciende hacia la superficie, surgiendo siempre en zonas topográficamente bajas, cauces fluviales o zonas de depresión. La temperatura de surgencia dependerá tanto de la profundidad del almacén, su recorrido hacia la superficie y la posibilidad de su mezcla en cotas superficiales con aguas frías.

En general, los recursos geotérmicos de Galicia son de baja y media entalpía, con una temperatura de almacén de 70 a 140°C. La principal aplicación de esta energía en Galicia sería como sistema de calefacción en invernaderos, granjas, etc., así como procesos industriales en los que se requiera poca energía (secado de materiales, pre-tratamientos térmicos, etc.). Se estima una potencialidad en esta zona de 20.000 a 30.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep) por año.

La provincia de Ourense

Ourense es la provincia gallega con mayor densidad de surgencias termales, destacando el foco de "As Burgas" en el centro de la ciudad, formado por tres manantiales, con un caudal de 5 litros/segundo y una temperatura de surgencia de 70°C. En términos genéricos, Ourense presenta un total de 95 surgencias conocidas, con un caudal total de 95,68 l/s. La temperatura media de surgencia es de 44-47°C, que

representa una potencialidad energética de 9.046 tep/año.

Desarrollo futuro

El aprovechamiento energético de los yacimientos gallegos ha de ir ligado, en primer lugar, a satisfacer en la medida de lo posible las necesidades de calor básicas en aquellas surgencias cuya explotación minero-medicinal se realice a través de un establecimiento balneario. Si bien esto en la mayoría de los casos ya se está realizando, podría optimizarse aun más mediante la combinación de bombas de calor geotérmico y energía termosolar, que podrían proporcionar calor en invierno y aire acondicionado en verano.

De hecho, la existencia o no de fluido que atrape el calor geotérmico ya no es indispensable para realizar una aplicación geotérmica directa. Simplemente con utilizar el subsuelo o pozos no explotados como foco intercambiador de calor, podríamos suplir más del 50% de las necesidades de calefacción y aire acondicionado para una vivienda tipo de nuestra comunidad.

La combinación de los focos geotérmicos de baja entalpía con la energía termosolar, así como la optimización de los procesos de intercambio de calor sobre surgencias termales es el reto que tiene por delante la comunidad gallega. ■

José Ángel Cid es becario MAE-AECI
Jaime Alonso Reyes es profesor del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (México)
Pedro A. Araujo es profesor de la Facultad de Ciencias de Ourense de la Universidad de Vigo

"Electric resistivity studies of the Laias geothermal area, northwestern Spain"J.A. Cid Fernández^{1,2}, P.A. Araujo Nespereira¹, J. A..Reyes López², J. Ramírez Hernández²

GEOTHERMAL RESOURCES COUNCIL 2006

San Diego, 10-13 Septiembre de 2006

¹Área Geodinámica Externa. Facultad de Ciencias de Ourense. Universidad de Vigo, Galicia, Spain.²Instituto de Ingeniería – Mexicali. Universidad Autónoma de Baja California. México.**ABSTRACT**

The geology and the results of electrical resistivity studies carried out in the low-temperature Laias geothermal area in Ourense, Galicia, Spain, are discussed. The results of the resistivity surveys validate the interpretation of the subsurface geology in the area. The crystalline basement (non-altered granitic rocks; R=5000 ohm-m) is covered by Quaternary deposits (R=300-1000 ohm-m). Resistivity range of these sedimentary layers is reduced by the presence of geothermal fluids (hot water 51°C) to 10-50 ohm-m.

This study confirms that Vertical Electrical Soundings are appropriate to explore and characterize low-enthalpy geothermal systems located at relatively shallow depths.

Keyword list: Low-temperature resource, Hot Springs, Electrical resistivity, Vertical electrical soundings, Spain.

1. INTRODUCTION

Laias (U.T.M. 579.963, 4.686.735 Huse 29) is a geothermal field of low temperature located in the northwest part of Spain (*Fig. 1*). Galicia has a total of 293 classified hot springs, its represents one of the most important geothermal area of low temperature in the Iberian Peninsula as much in temperature as in discharge rate.

Spas and bottling plants of drinking water are the most important uses of this hot springs. There are 28 active spas in Galicia with a global income of 36 million of euros in 1998 (45.11 mills. \$). Galician bottling miner-medicinal water represents 7% of the national production of this sector (*Conselleria de Industria y Comercio. Xunta de Galicia, 1995*).

Abundant romans culture ruins be present in the area. Antiques Roman bathrooms, (called *Acquae Leae*) can be found, their use was prolonged along the Half Age. The most recent historical data refer by the middle of century XIX. In that time, swimming pools carved in granitic rocks were in use by about 300 swimmers per year (*Taboada Leal, 1877*). After that, the first modern spa was building at the beginning of century XX, but it was destroyed by a grown of the Miño River in 60's. A new spa was built only for summery activity in 1977. In 2001, it was substituted by a modern spa (*Rodríguez Míguez, 1995*)

The waters from Laias hot springs are classified as hyper-thermal (51 °C), of alkaline and sodium-bicarbonate type, having an average conductivity of 774 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and a pH of 7.53 (measured at 20°C; *Souto Figueroa, 1998*).

The geothermal area is in Hercynian crystalline rocks, i.e. in two-mica quartz monzonites Quartz monzonites of the Carballiño-Allariz Massif, that present some aplitic and quartizitic dikes as well as pegmatites. Some shallow Quaternary sedimentary rocks and sediments are found locally.

Electrical resistivity surveys have wide applications in hydrological and geothermal investigations because of the alteration of the subsurface electrical resistivity due to effects associated with thermal anomalies (Lal Arora, 1986; Thanassoulas et al., 1987; Monteiro Santos et al., 1997; Majumdar et al., 2000; Rajver and Ravnik, 2003). As many other geothermal areas, Laias present horizontal and vertical changes in lithology, temperature, chemistry, porosity that can be identified by analyzing changes resistivity data.

The objectives of Laias study present here are to: (1) identify the geologic and tectonic setting of the geothermal area; (2) correlate geologic strata to resistivity values obtained from electric vertical soundings; and (3) determine the size of the thermal anomaly and its relationship to the tectonic features of the area.

2. GEOLOGICAL AND TECTONIC SETTING

The Laias geothermal area is in the Hesperian Massif, in the “Centro-Ibérica” zone (Julivert et al., 1972) or “Galicia-Tras-Os-Montes” zone (Farias, 1987).

The thermal area is located in the most external and extensive basin of the Massif where the most intense sedimentation took place. That part of the Massif constitutes the nucleus of the Hercynian orogeny and is where the most complex tectonic structures with higher metamorphism degree and plutonism are found (*Araujo Nespereira, 1985*).

Lithologic description of Laias rocks

Hercynian crystalline rocks: Quartz monzonites

The most common type of crystalline rocks found at Laias are of clear color and of medium grain size. They are quartz monzonites rocks composed of quartz, potassium feldspar, plagioclase, muscovite and biotite (*I.T.G.E., 1989*).

Quaternary deposits.

Fluvial terraces

These terraces found along the entire basin of Miño river are formed by boulders of quartzite, quartz and (some) granitic rocks, cemented by a sandy-clayey matrix of ochre and grayish colors. In the Laidas area of the Miño river two levels of terraces have been recognized. The upper one, very thin, located 100 m above the riverbed consists of clays and sands, with interbedded boulders of quartz and quartzites, up to 15 cm in diameter. The lower terrace is about 2 m above the riverbed and follows the river discontinuously. Some erosional remnants are found, which are composed by red clays, sands and boulders of quartzite and quartz of up to 20 cm diameter.

Colluvions

These materials are mainly sandy and clays of brown to reddish color forming a matrix around randomly distributed, angular quartz granite and quartz monzonite boulders of up to 14 cm diameter. These boulders are found in variable quantities (from 1 to 20%) and tend not be in mutual contacts. These colluvial deposits whose thickness vary between 0.5 and 1.5 m, have been found to the north and northwest of the spa area. They form an almost continuous belt of outcrops more than 500 m long, which is cut by alluvial formations from the Barbantiño river.

Alluvial deposits

These sedimentary deposits composed by quartz sands, well-rounded quartz gravels and elongated boulders of two-mica granites (largest axes up to 10 cm). All of these coarser materials are embedded in a brown to blackish clay-shale matrix that presents abundant organic matter. The alluvial deposits are thinly stratified (less than 1 m) and their presence is constrained by the morphology of the river valleys. The Barbantiño river crosses the thermal area from north to south and Laidas river, located northeast of the hot spring, both discharge into the Miño river that runs from northwest to southeast.

Antropic materials

Brushes, sterile quarry, arid materials, landfills, etc are very abundant around the Spa. These materials occupy an extension of about 300 m in the river bank because of the intention to construct a walking corridor around the spa along Miño river. Besides this, with the same materials, the basement of railroad, of 10 m width, is actually constructed.

A complex mesh of heterogeneous fractures were produced by of the post-Hercynian orogeny, creating two conjugate sets of fractures. One of striking N10-N60°E and the other, N90-N130°E.

The orogenic stage was followed by an intense period of erosion that uncovered the granitic and metamorphic basement. The present relief characteristic of the Galician landscape, are product of the Alpine orogeny, which reactivated the Hercynian fractures. The new tectonic movements transformed the eroded surface into one presenting horts (upper blocks) and grabens (sunken blocks).

Three sets of recently reactivated faults with main post-Hercynian orientations: N45°E, N130°E and N-S, has been reported lately (González-Casado and Giner Robles, 2000). The orientation of the first sets agrees with the direction of the maximum horizontal compression, while the other two, with those of maximum horizontal extension allowing the circulation the geothermal fluids.

Fracture studies in the Laias area have been done at two levels: (1) analysis of lineaments by aerial photography, and (2) micro-fracture measurements at outcrop level. The set of fractures striking N10°E is shown by the aerial photograph analysis (Fig. 1). This set controls the topography of the area and its fluvial network including the Miño and Barbantiño rivers.

Main fracture lineaments observed in aerial photographs were matched against data from micro-fracture measurements made on outcrops. The results of 126 measurements were plotted on a rose diagram. The most frequent orientations were: N0-15°E, N90-120°E and N150-170°E. The planes of the N0-15°E fracture set are hydrothermally altered.

Fractures in the Laias thermal area show three orientations: N-10° E, N-100°E and N-160° E.

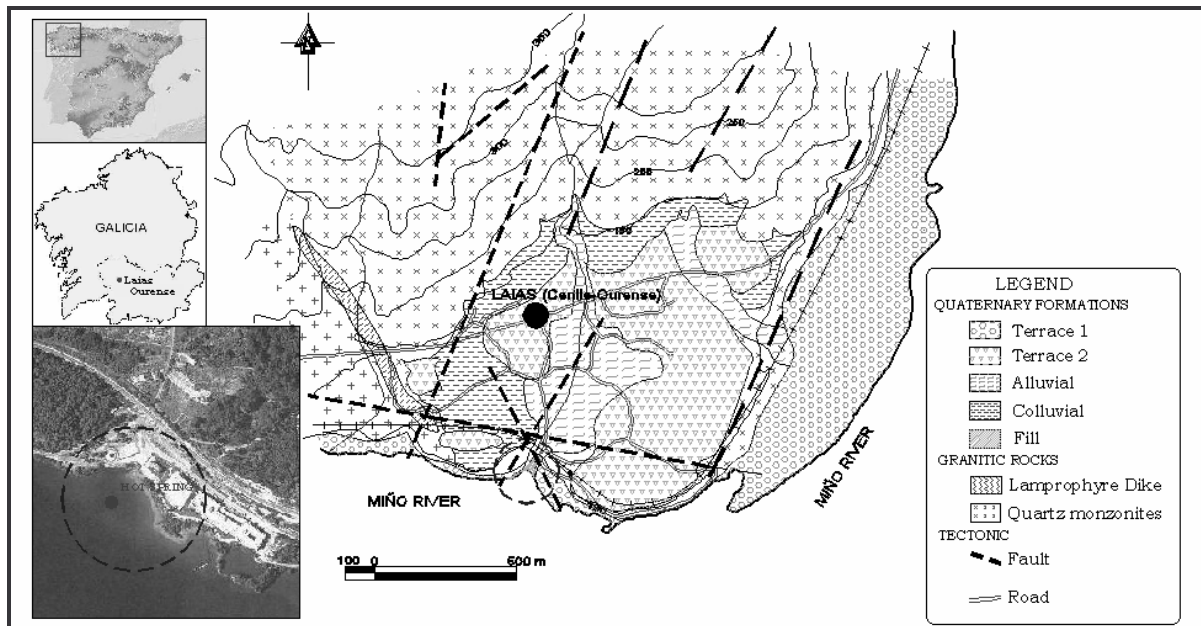


Fig. 1. Geological and tectonic features of Laias geothermal field

3. ELECTRICAL RESISTIVITY SOUNDINGS

Electrical resistivity techniques to explore and characterize the subsurface of geothermal areas and groundwater aquifers have been applied extensively (*Lal Arora, 1986; Thanassoulas, Tsokas and Kolios 1987; Monteiro Santos, Andrade Afonso, Mendes Victor, 1997; Raju and Reddy, 1998; Majumdar et al., 2000*).

Vertical Electrical Soundings (VES) were carried out at 27 locations on and around the Laias thermal springs area. Schlumberger arrays were used with a maximum distance between current electrodes (AB/2) of 30-45 m. Topography and man-made structures in the area conditioned the length of the arrays and of the electrode apertures that were used in the study (Fig. 2). An E2 Digit instrument was utilized to acquire the SEV data.

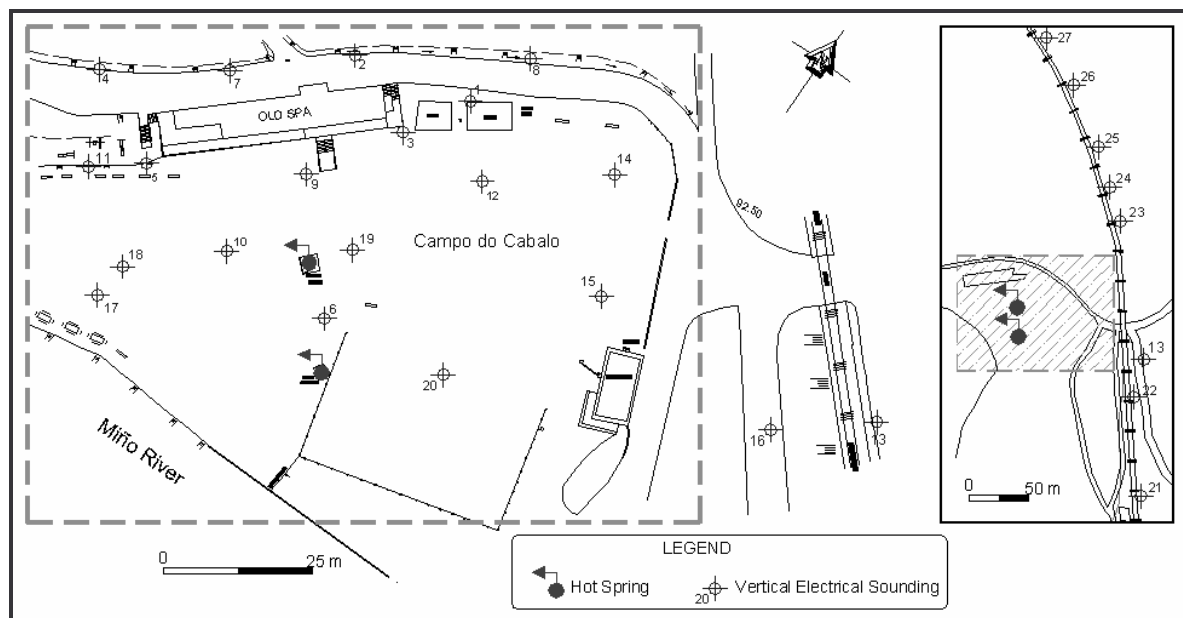


Fig. 2. Laias geothermal area. Locations of VES (Schlumberger) stations

Field data were interpreted by a one-dimensional inversion technique from the computer software package VES.EXE (Pasigeophysics©). Since the lithology of the area down to the top of the crystalline rocks was known, the computed apparent resistivity pseudosections between adjacent VES (VES 11, 5, 9, 3 and 12) having the same AB/2 aperture direction, we were able to confirm the presence of the thermal anomaly (*I.G.M.E., 1984*). (Fig. 3).

The bell-shaped distribution of apparent resistivity coincides with that of the fractured crystalline basement at depth. This is best seen by looking at Fig. 4 corresponding to SEV 9.

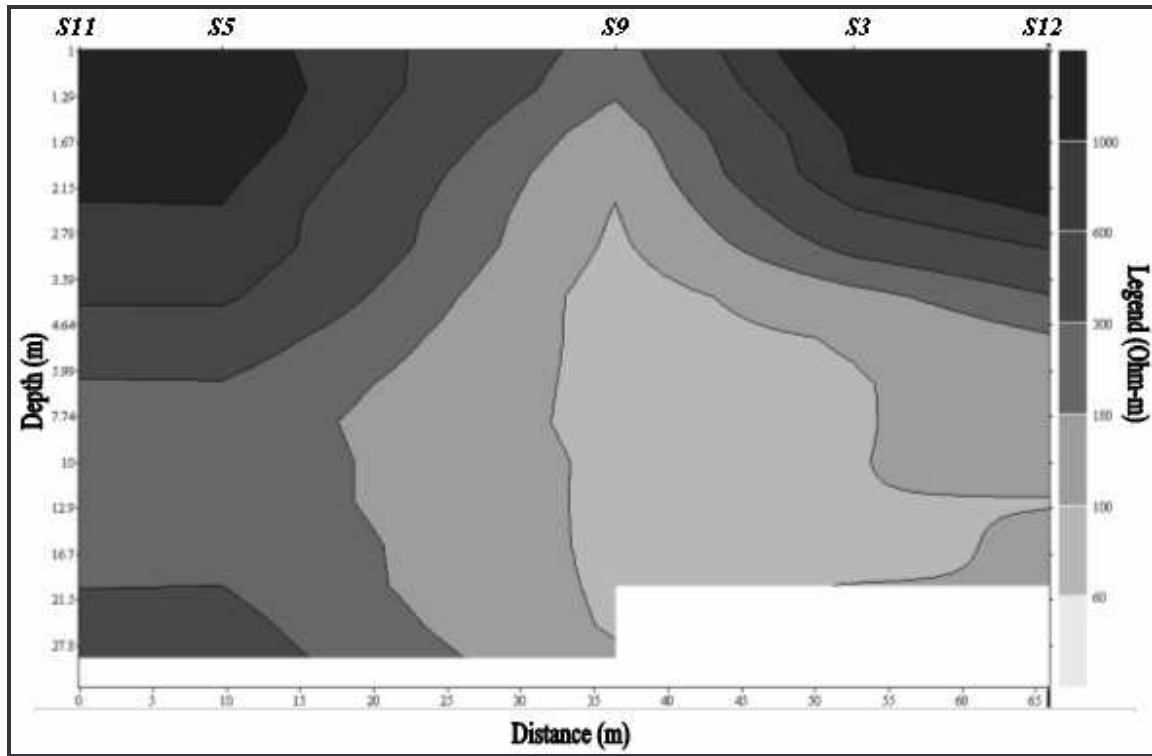


Fig. 3. Pseudosections of apparent resistivity VES 11, 5, 9, 3 y 12.

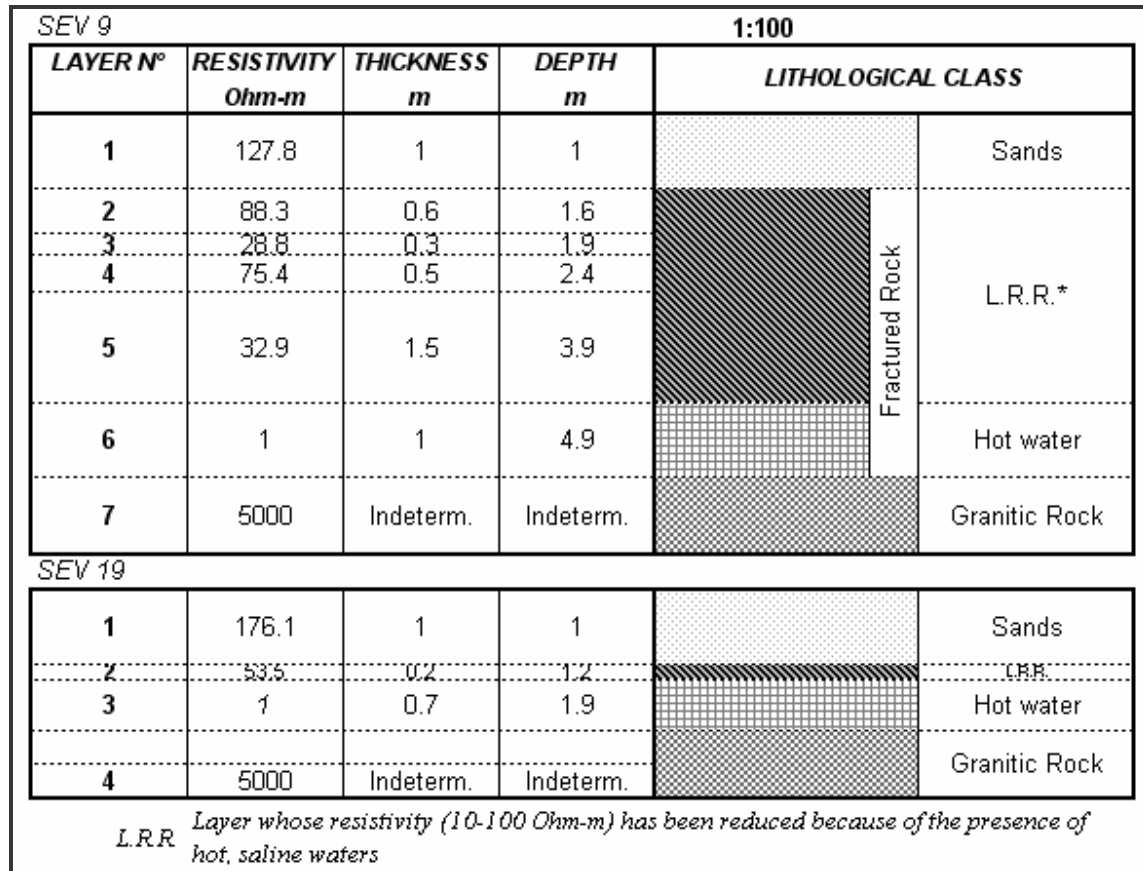


Fig. 4. Proposed models of subsurface lithological divisions in Laias geothermal area (VES 9 and 19)

The vertical distribution of layers was obtained by analyzing the resistivity data. A layer of high-resistivity (crystalline non-altered basement rocks; R=5000 ohm-m) is overlaying other layers (Quaternary rocks and sediments; R = 300-1000 ohm-m), whose resistivity has changed by the presence of hot and highly saline geothermal fluids (R=30-150 ohm-m). Hot water (51°C) in SEVs 3, 6, 9, 19 and 20 reduced the resistivity of the Quaternary layers from 300-1000 ohm-m to 10-50 ohm-m.

One should not mention that resistivities in the 1-20 ohm-m range are interpreted as associate with the presence of circulating geothermal fluids.

The data obtained from SEVs campaigns shows Laias geothermal spring is associated to the set of fractures with northern orientation (N10°-20° E), although it is inferred that the fractures striking N110° E facilitate the circulation of these fluids at depth.

Figure 5 shows the simplified apparent resistivity map obtained from the VES, using an average AB/2 spacing of about 6.5-8 m. The reference topographic level of 83 meters above sea level (masl)

represents the corrected elevation considering that of the VES. The two resistivity values shown in Fig. 5 represent:

- (1) Resistivity <100 ohm-m: It corresponds to the area one would associate to the thermal anomaly. The irregular shape can be interpreted as caused by the near-surface circulation of hot fluids through porous/permeable sedimentary formation.
- (2) Resistivity 100-300 ohm-m. This area defines a region of thermal influence, in which the anomaly is not manifested with so much clarity as in the previous case.

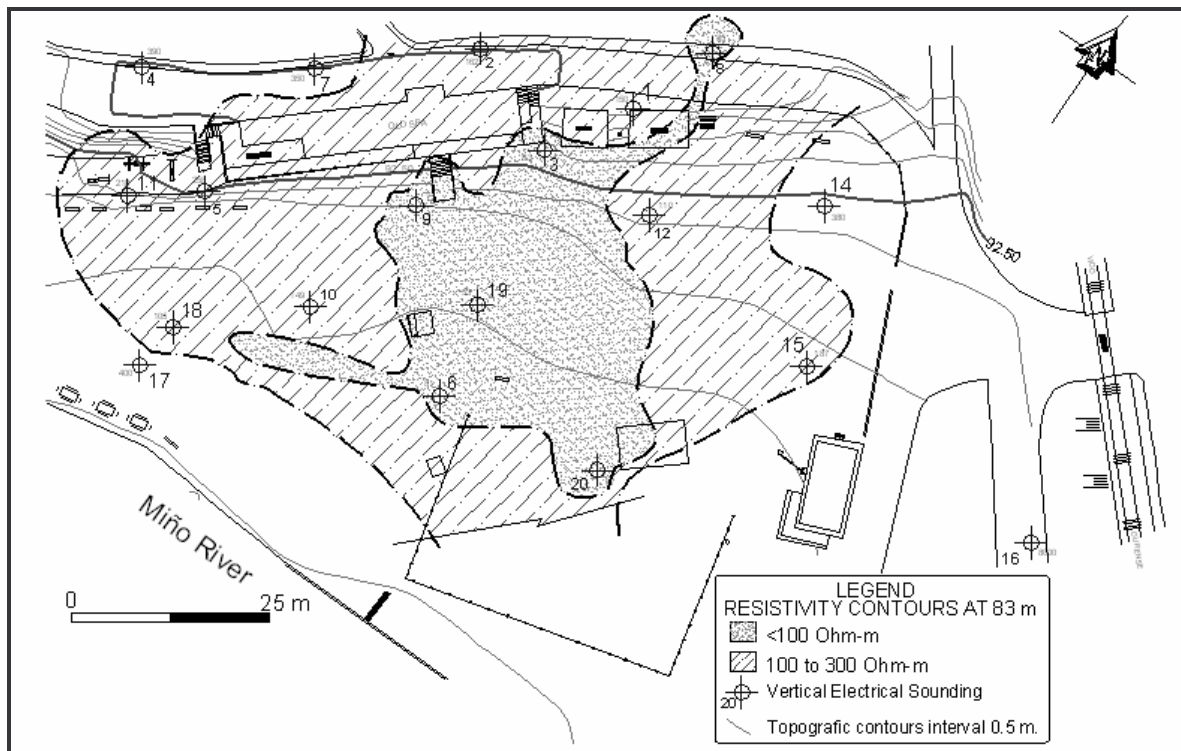


Fig. 5. Laias geothermal area. Resistivity distribution at 83 m.a.s.l.

The distribution of the low resistivities shown in Figure 5 reflects the presence of hot waters at shallow levels. These waters have ascended through the fractures in the crystalline basement, moving in the subsurface to the S-SW towards the Miño river following the topography of the top of the basement rocks .

4. CONCLUSIONS

The geoelectrical, lithological and tectonic studies of the Laias geothermal area (Ourense-Galicia-Spain) indicate that the thermal anomaly has the following characteristics,

(1) The lithology is represented by two well defined units: a crystalline compact substratum (two-mica quartz monzonites) of high resistivity, and shallow Quaternary formations (alluvial and colluvial units) whose resistivities vary with the amount of hot and saline geothermal waters they contain. The crystalline basement (unaffected granitic rocks 5000 ohm-m) is covered by quaternary silts ($R = 300-1000$ ohm-m). Resistivity range of this layers is reduced by the presence of geothermal fluids (hot water 51°C in SEVs 3, 6, 9, 19 and 20) to 10-50 ohm-m). The representation of these values by profiles of apparent resistivity allows define the geometry of the anomaly.

(2) The application of indirect electrical resistivity surveys, such as the VES, is shown to be very useful to define the geometry of geothermal areas that present abundant fractures like the one at Laias. These lower cost exploration techniques are well suited to study low-enthalpy geothermal systems that are found at relatively shallow depths.

(3) The geothermal areas of NW Spain are located at or near clusters of fractures in impermeable crystalline basement rocks. The analysis of lineaments by aerial photographic showed three principal faults or fracture sets in the in the area of the Laias spa: N-10° E, N-100° E and N-160° E.

(4) The Laias geothermal spring is associated to the set of fractures with northern orientation (i.e., N10°-20° E), which can be found at the surface, although it is inferred that the fractures striking N110° E (not observed at the surface) facilitate the circulation of these fluids at depth.

(5) Fill materials and man-made structures affected the distribution of resistivity near the surface (Fig. 5) smearing the actual linear nature of the surface. This effect generates an influence zone that masks in surface the linearity of the surfacial manifestation.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Caldaria Hotels and Spas (Galicia, Spain) for providing research facilities. J.A.C. thanks the Spanish Ministry of Foreign Affairs for the "MUTIS" training-research grant.

6. REFERENCES

- Araujo Nespereira, P.A., 1985. Las Aguas Termales del SE de Galicia. Nova Acta Científica Compostelana Vol. XXIII (2/3/4), pps. 967-989
- Conselleria de Industria y Comercio. Xunta de Galicia, 1995. As Augas Minerais en Galicia.
- González-Casado, J.M. and Giner Robles, J., 2000. Faults and sismicity in the Northwest part of the Iberian Peninsula" Geogaceta nº 28. Pag 71-74.
- Farias, P., Gallastegui, G, González Lodeiro, F., Marquinez, J., Martin Parra, L.M., Martinez Catalán, J.R., De Pablo Macia, J.G. y Rodríguez Fernández, L.R., 1987. Aportaciones al

- conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de Galicia central. Mem. Mus. Lab. Min. Geol., Fac Ciencias do Porto, 1, 411-431.
- I.G.M.E., 1984. Energía Geotérmica. Instituto de la Ingeniería de España; Comité Energía. Instituto Geológico y Minero de España.
- I.T.G.E., 1989. Mapa Geológico de España Escala 1:200.000 Ourense/Verín". Ministerio de Industria y Energía; Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales.
- Julivert, M., Fontbote, J.M., Ribeiro, A., Conde, L. 1972. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. Instituto Geológico Minero de España. Madrid.
- Lal Arora, C., 1986. Geoelectric study of some Indian geothermal areas. *Geothermics* 15, 677-688.
- Majumdar, R.K. et al., 2000. Geoelectric investigations in Bakreswar geothermal area, West Bengal, India *Journal of Applied Geophysics* 45 187-202.
- Monteiro Santos, F.A., Andrade Afonso, A.R., Mendes Victor, L.A., 1997a. Study of the Chaves geothermal field using 3D resistivity modeling. *J. Appl. Geophys.* 37, 85-102.
- Raju, N.J., Reddy, T.V.K., 1998. Fracture pattern and electrical resistivity studies for groundwater exploration. *Environ. Geol.* 34, 175-182.
- Rajver, D., Ravnik, D., 2003. Geothermal characteristics of the Krko basin, Slovenia, based on geophysical research. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol. 28, 9-11, 443-455.
- Rodríguez Míguez, L., 1995. Estudio Histórico Bibliográfico del Termalismo: Principales Surgencias de la Provincia de Ourense". Deputación Provincial de Ourense.
- Souto Figueroa, M., 1998. Las aguas minero-medicinales de la provincia de Ourense. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela (España).
- Taboada Leal, N. 1877. Hidrología médica de Galicia. Madrid.
- Thanassoulas, Tsokas and Kolios 1987. Geophysical investigations in the geothermal field in the delta of the nestos river (Northern Greece) *Geothermics*, Vol. 16, 1, 17-26.

"Evaluación de las propiedades térmicas del subsuelo de Mexicali mediante Test de Respuesta Térmica (Baja California, México)"

J.A. Cid-Fernández^{1,2}, P.A. Araujo Nespereira¹, J. A. Reyes López², J. Ramírez Hernández²

¹*Área Geodinámica Externa. Facultad de Ciencias de Ourense. Universidad de Vigo, Galicia, Spain.*

²*Instituto de Ingeniería – Mexicali. Universidad Autónoma de Baja California. México.*

1. INTRODUCCIÓN

Los Test de Respuesta Térmica del subsuelo se han desarrollado de forma casi pareja en Estados Unidos y Suecia hace una década. El modelo americano de la Universidad de *Oklahoma State* [1] fue construido en el año 1995 con el objetivo de obtener datos térmicos (*conductividad, difusividad y capacidad calorífica*) del entorno de un pozo experimental. Estos valores tienen una alta influencia en el coste inicial de un sistema de calefacción mediante pozos geotérmicos. La mayoría de instaladores los estiman en función de la litología observada en la perforación comparándola con valores tabulados en manuales [2], si bien, en la mayoría de los casos no se trata de un único estrato geológico, y las condiciones de fracturación o presencia de flujos subterráneos pueden hacer variar mucho los valores estándar.

La investigación en la Universidad de *Oklahoma State*, consistió en diseñar un sistema móvil que permitiera estimar, en base a valores reales, las propiedades térmicas del subsuelo. Paralelamente, se desarrolló un modelo numérico del pozo y sus alrededores usando los parámetros medidos. Las variables del modelo eran la conductividad térmica del subsuelo y de la lechada de relleno, ajustando sus valores a los datos experimentales y minimizando la diferencia entre los resultados experimentales y el modelo numérico. El modelo matemático desarrollado y validado mediante el sistema de test de respuesta térmica in-situ creado por la Universidad de *Oklahoma* permite estimar la conductividad térmica del subsuelo de esa zona de *Estados Unidos* con una incertidumbre de $\pm 12\%$, reduciendo la incertidumbre en la longitud del pozo de intercambio a $\pm 5\%$.

El modelo sueco de la Universidad de *Lulea* se desarrolló paralelamente en el tiempo respecto al americano (1996) [3]. Suecia encabeza el uso de la geotermia de baja temperatura mediante las bombas de calor con pozos geotérmicos en el continente europeo. A pesar del gran desarrollo tecnológico en la eficacia de las bombas de calor y en los sistemas de distribución del calor en superficie, las propiedades térmicas del subsuelo se siguen calculando en base a valores estándar, o mediante métodos de laboratorio [4] bastante caros y poco concluyentes.

Basado en el modelo de *Morgensen* [5], *Gehlin* construyó en 1995 el primer equipo para la estimación in situ de las propiedades térmicas del subsuelo, introduciendo una fuente externa de calor que permite introducir pulsos constantes de calor al subsuelo y monitoreando las temperaturas de entrada y salida continuamente durante el tiempo de duración del test. Asimismo, como objetivos complementarios de la investigación, se evaluaron diferentes tipos de rellenos en los pozos, número y disposición de la tuberías de intercambio, la influencia de la presencia de agua subterránea (muy común en el Norte de *Europa*), y la comparación de los datos experimentales obtenidos con cuatro modelos matemáticos que intentan simular el comportamiento térmico del pozo y su entorno. La investigación sueca también incluyó el efecto de la presencia de agua subterránea y la distribución de calor por convección en los pozos. Con niveles muy superficiales de agua subterránea, se comprobó que existe un aporte de calor convectivo y que este es mayor cuanto mayor sea la circulación de agua en el pozo.

Ambos trabajos, además de alcanzar los objetivos propuestos, establecen un protocolo de desarrollo de los TRT y apuntan otras líneas que deben ser más profundamente investigadas como la respuesta térmica en zonas fracturadas con diferentes inyecciones de calor e incluso valorar la posibilidad de realizar los TRT durante la perforación, lo que permitiría realizar un test para cada pozo perforado.

Estas dos investigaciones han abierto el camino para la evaluación in situ del subsuelo. Cinco modelos comerciales de este sistema se han desarrollado en *Estados Unidos*, y en *Europa*, *Alemania*, *Noruega* y *Turquía* ya poseen equipos similares al sueco, mientras que *Suiza*, *Canadá* e *Inglaterra* han construido sus propios equipos que, básicamente, siguen el mismo fundamento teórico que el sueco.

En el año 2003, *Georgiev et all.* [6], de la Universidad Técnica de *Valparaiso*, *Chile*, realizaron el primer test de respuesta térmica en el subsuelo de Chile. La investigación se enfoca como un primer paso en el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía subterránea en la región. Metodológicamente realizan el mismo trabajo que *Austin* en *Oklahoma* (EEUU) y *Gehlin* en *Lulea* (Suecia). Como complemento, los autores evaluaron el comportamiento de un sistema híbrido, pozo geotérmico alimentado por energía solar mediante un colector solar de 4,4 m² [7].

2. OBJETIVOS

- Diseño y construcción de un equipo de evaluación térmica del subsuelo.
- Evaluar las propiedades térmicas de un pozo de intercambio geotérmico ubicado en el Campus de la UABC en Mexicali.

3. MARCO TEÓRICO

La evaluación de los datos obtenidos con el TRT se basa en un modelo conceptual que engloba los procesos de intercambio de calor que ocurren entre el pozo y su entorno. El modelo más utilizado y que se aproxima de una manera más fiable al resultado real en campo es el modelo de foco lineal [8].

a) Modelo de foco lineal

- Transferencia de calor entre el pozo y su entorno.

Ingersoll and Plass (1948) [9]

Diseño de intercambiadores de calor con el subsuelo.

Morgensen (1983) [5]

Primer equipo de medición de la conductividad térmica del subsuelo in situ. Sus aproximaciones constituyen la base teórica de los test de respuesta térmica en Europa.

Parte de la ecuación para la estimación de la temperatura de un fluido, dentro de un pozo de intercambio, como función del tiempo (t) y el radio del pozo (r) formulada por Carslaw y Jaeger (1959) [10]. Alrededor del pozo se asume un foco lineal de calor con una tasa constante de inyección al pozo de intercambio geotérmico (q).

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad [\text{ec. 1}]$$

siendo

<i>r</i>	Radio del pozo	<i>m</i>
<i>t</i>	Tiempo	<i>s</i>
<i>λ</i>	Conductividad térmica	$\frac{W}{m^2 K}$ $\frac{Btu}{hr \text{ ft}^2 F}$
<i>E₁</i>	Integral exponencial	
<i>a</i>	Difusividad $a = \lambda/c_p$	m^2/s

c_p	Capacidad calorífica específica del subsuelo	$\frac{J}{m^3 K}$ $\frac{Btu}{lb F}$
-------	--	--------------------------------------

Para valores altos del parámetro, E_1 puede ser aproximada mediante la siguiente relación:

$$E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) = \ln\left[\frac{4at}{r^2}\right] - \gamma \quad \frac{at}{r^2} \geq 5 \quad [\text{ec. 2}]$$

siendo:

E_1	Integral exponencial	
$\gamma = 0,5772$	Constante de Euler	
	$\frac{at}{r^2} \geq 20$	$\frac{at}{r^2} \geq 5$
<i>Error</i>	2,5%	10%

La temperatura del fluido se evalúa calculando la temperatura del foco lineal en el límite del pozo ($r = r_b$) y añadiendo el efecto de la resistencia térmica entre el fluido y la pared del pozo R_b . La temperatura del fluido puede ser calculada como función del tiempo:

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right) + q \cdot R_b + T_0 \quad [\text{ec. 3}]$$

T_0	Temperatura constante del subsuelo	$^{\circ}C$ $^{\circ}F$
-------	------------------------------------	-------------------------

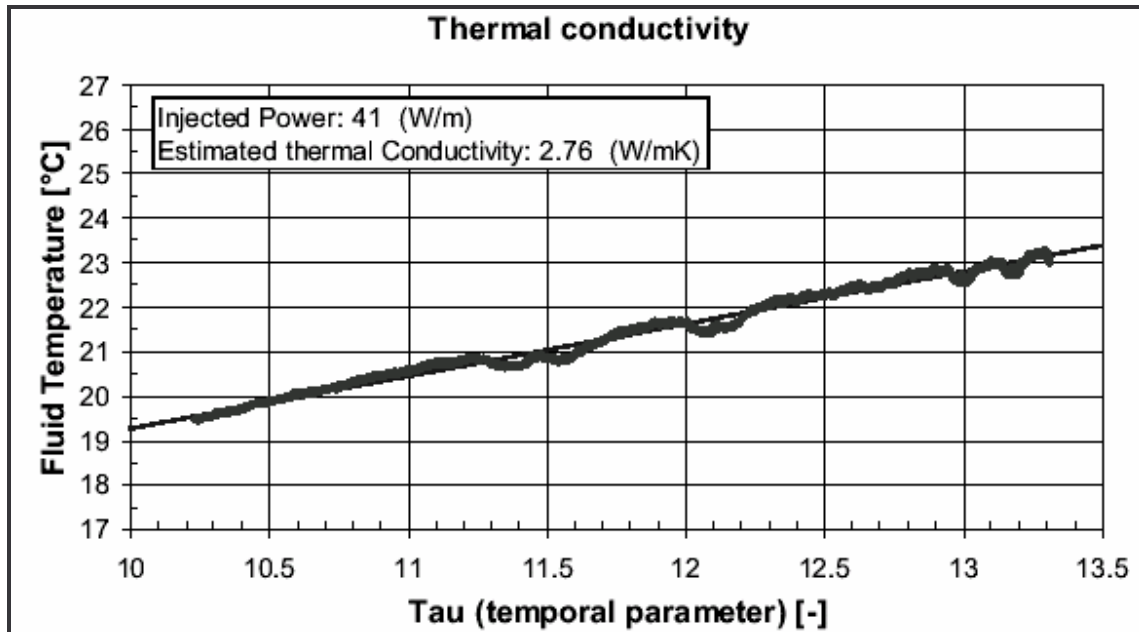


Fig.01 Representación gráfica de los datos de un TRT. Modelo de foco lineal. (Steinmann, 2005 [11])

4. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Un equipo de monitoreo para la determinación in situ de las características geotérmicas del subsuelo de Mexicali se ha desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UABC (Mexicali). Sobre el fundamento teórico del método de calentamiento (Mogensen, 1983), se busca poder determinar los siguientes parámetros:

- Temperatura invariable del subsuelo de Mexicali.
- Conductividad térmica (W/m K).
- Resistividad térmica del (m^2K/W).

4.1 Cálculos previos

Se ha programado un modelo teórico de respuesta en MATHLAB. Los parámetros de diseño del experimento se han extraído de modelos previos descritos por Gehlin[3], Austin[1], Roth[6], Steinmann[11] y Sanner[12]. La estimación inicial de las propiedades del

subsuelo se ha obtenido del *Soil and Rock Classification for the Design of Ground- Coupled Heat Pump Systems-Field Manual* [2].

Parámetro	
Datos del Pozo	
Profundidad (m)	10.5
Diámetro (m)	0.1
Material	Arcilla saturada
Conductividad térmica (W/m*K)	1.67
Difusividad térmica (m ² /s)	6.66e-07
Temperatura constante del subsuelo	25.5 °C
Resistividad térmica estimada (m*K/W)	0.1
Datos del test	
Inyección de calor (W/m)	45
Flujo (L/s)	0.027
Duración del test (h)	24
Condición de Mogensen	22.79 (e<0.025)

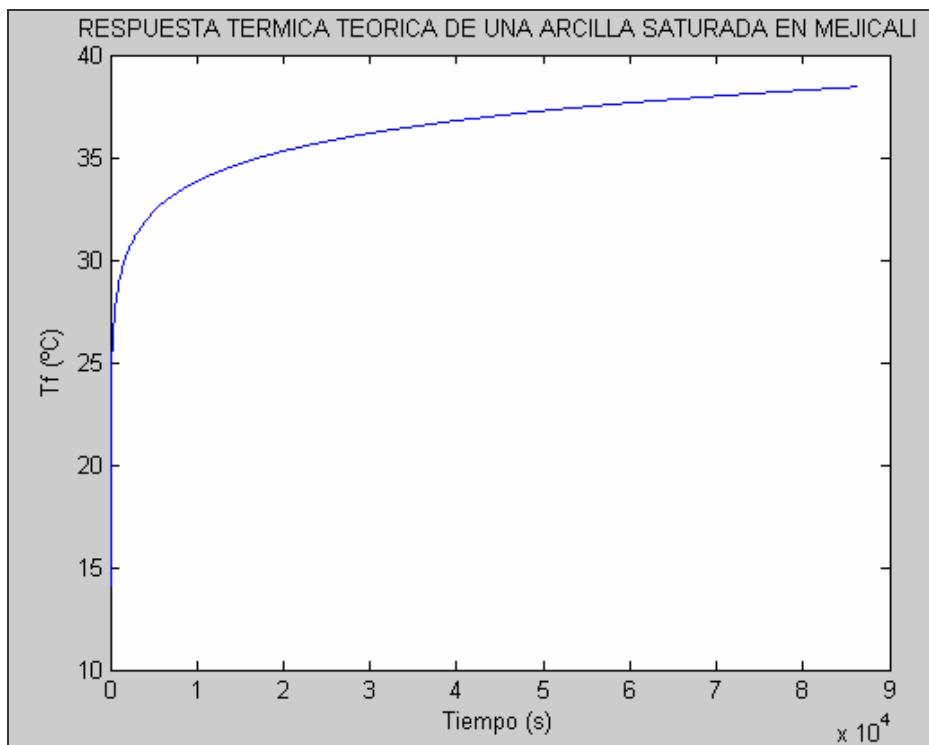


Fig 02 Respuesta térmica teórica del subsuelo de Mexicali

4.1 Perforación e instrumentalización del pozo de intercambio geotérmico

Durante los días 9 y 10 de Octubre se realizó la primera fase de perforación alcanzando la profundidad de 7.20 m. El sondeo se realizó en la parte exterior de los almacenes anexos al Instituto de Ingeniería del campus de la Universidad Autónoma de Baja California siendo sus coordenadas geográficas:

32° 37' 50'' Norte

115° 26' 43'' Oeste

Para la ejecución del mismo se empleo una maquina perforadora AUGER introduciendo 6 brocas helicoidales de 1.20 m de longitud y 100 mm. de diámetro, sumando un total de 7.20 m. Posteriormente, la parte inferior de la perforación se colapsó quedando la profundidad final del pozo de intercambio geotérmico en 6.30 m.

El objetivo de esta primera perforación es 1) Evaluar el comportamiento de la maquina perforadora; 2) Análisis del subsuelo entre los 0 y 6 m. de profundidad.; 3) Monitoreo de temperatura y profundidad del nivel freático. La temperatura del subsuelo a los 6 metros es muy similar a la temperatura constante del subsuelo, necesaria para la posterior evaluación de los datos del TRT.

La recolección de datos se llevo a cabo desde las 17:00 h. del 22 de Octubre a las 12:20 h del 14 de Noviembre con captura de datos con un intervalo de 10 minutos. Se utilizó un sensor con almacenamiento automático de datos con una precisión de ± 0.1 °C. Podemos observar como la temperatura se mantiene en 25.7°C durante los 2 primeros días, ascendiendo a 25.8°C durante los siguientes 10 días. En el día 12 alcanza 25,9°C, siendo la lectura constante de los últimos 2 días de 26,0°C. Este ascenso gradual es repercutible al hecho de que, a pesar de permanecer sellado en su boca, la columna de aire del pozo se va calentando por el intercambio con el aire exterior, aumentando progresivamente la temperatura medida en el pozo. El valor obtenido en los 2 primeros días, es significativo de la temperatura constante del subsuelo y se sitúa 1 grado por encima de la temperatura media ambiente en Mexicali.

El nivel freático del pozo se mantuvo a una profundidad de 6.15 metros con una variación de ± 2 cm.

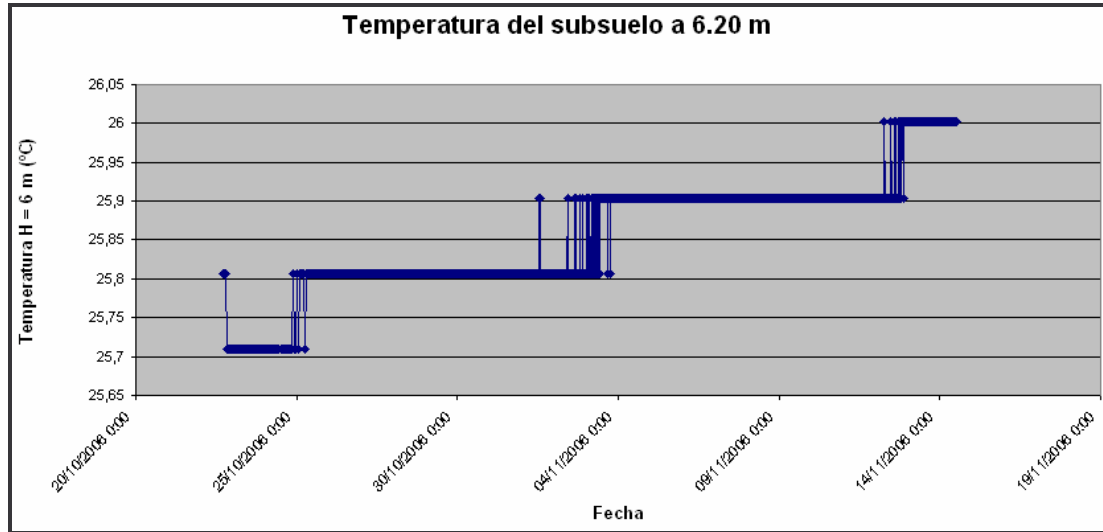


Fig 03 Representación gráfica de los datos de T a 6 m de profundidad

La perforación se completo hasta una profundidad libre de 10.80 m y 100 mm. de diámetro. El pozo se instrumentalizó introduciendo 2 ramales de tubería de polietileno de alta densidad unidos en U en su extremo mediante termofusión hasta una profundidad de 10.50 m. Posteriormente el PIG fue rellenado con arena silíceas hasta su rasante.

La tubería en U instalada en el PIG es de polietileno de alta densidad (3/4 plg. SDR 11 PE 3408) con las siguientes características:

Tabla 01

Características principales de la tubería HDPE ¾ plg SDR 11	
Diámetro externo	26.67±0.127 mm
Espesor de la pared	2.413±0.5 mm
Diámetro interno	21.336 mm
Densidad	0.941-0.955 g/cm ³
Temperatura máxima de trabajo	90 °C
Conductividad térmica	0.4 W/m*K



Figura 4.- Perforación



Figura 5.- Pozo instrumentalizado

4.2 Equipo de medida

El condicionante principal para un buen desarrollo del TRT es la precisión en la lectura de las temperaturas de entrada y salida del fluido al pozo así como la estabilidad en la inyección de calor al subsuelo. El equipo diseñado consta de una fuente eléctrica de calor de 2500 W que calienta un baño por el que se hace circular la tubería. El sistema está impulsado por una bomba de circulación tipo PKM 60-1 Pedrollo, Italia con un consumo eléctrico nominal de 370 W, trabajando a 2900 rpm con un flujo entre 5 y 40 l/min. La altura máxima de cabezal es de 40 m.

4.3 Duración del experimento

Después de varias pruebas de calibración y varios días de reposo, el experimento final se inició a la 7:02 horas del día 29 de Noviembre, finalizando a las 0:19 horas del día 30, completando un total de 15 horas. Esta duración cumple con los condicionantes expresados en el modelo teórico, obteniendo resultados con un error inferior al 2.5%.

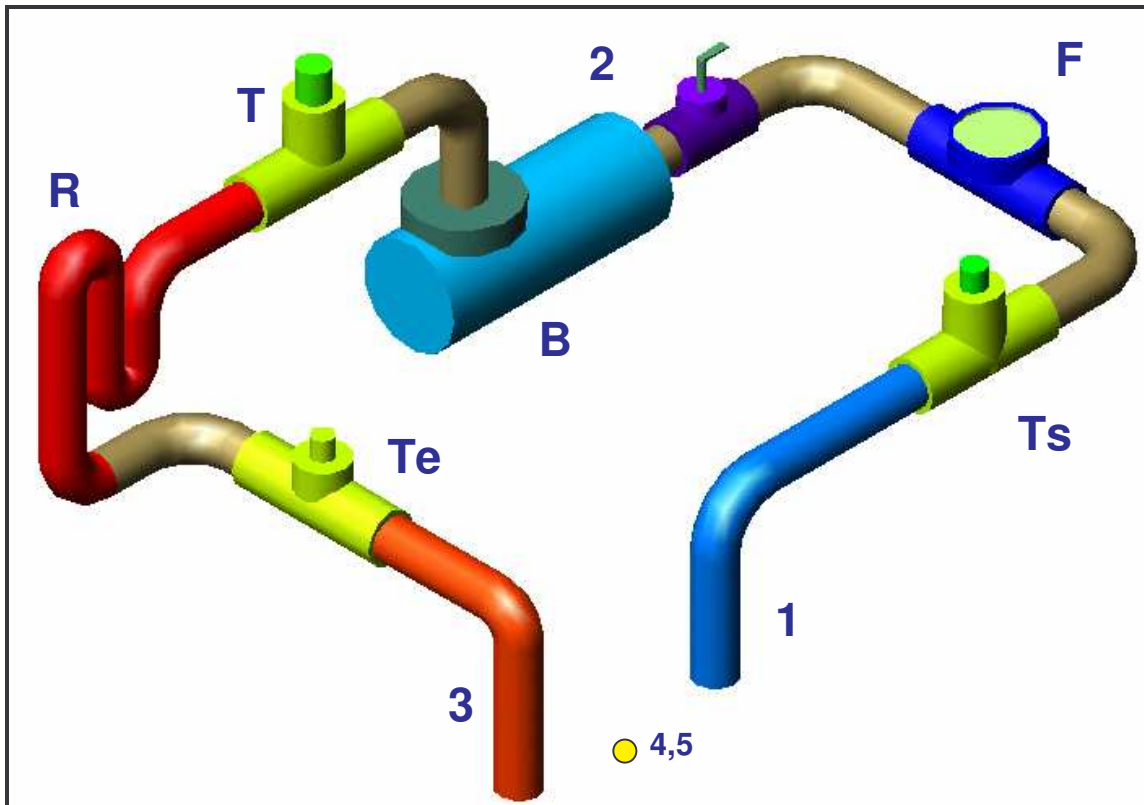


Fig 06.- Vista axonométrica de los equipos de medida del TRT

Numero	Identificación
1	Tubería de salida del PIG
Ts	Sensor de temperatura °C
F	Rotámetro de caudal L/s
2	Llave de paso
B	Bomba de circulación PKM-60 3700 W
T	Sensor de temperatura °C
R	Resistencia eléctrica 2500 W
Te	Sensor de temperatura °C
3	Tubería de entrada del PIG
4,5	termocouples tipo K (Cr/Al) a 4 y 9.50 m.



Figura 07.- Test de respuesta térmica. Equipos de medida.

5. RESULTADOS

5.1 Calor inyectado

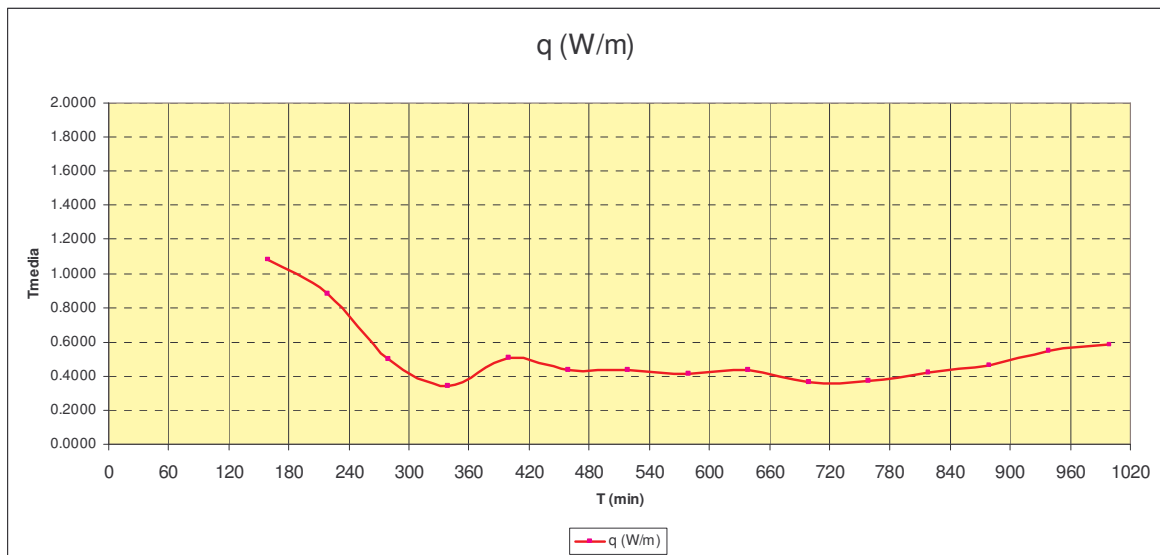


Figura 08.- Evolución de la energía externa inyectada en el pozo.

- ❖ Media 15 horas $Q = 518.3 \text{ W}$
- ❖ Inyección lineal = 49.36 W/m

5.2 Gráficos de respuesta

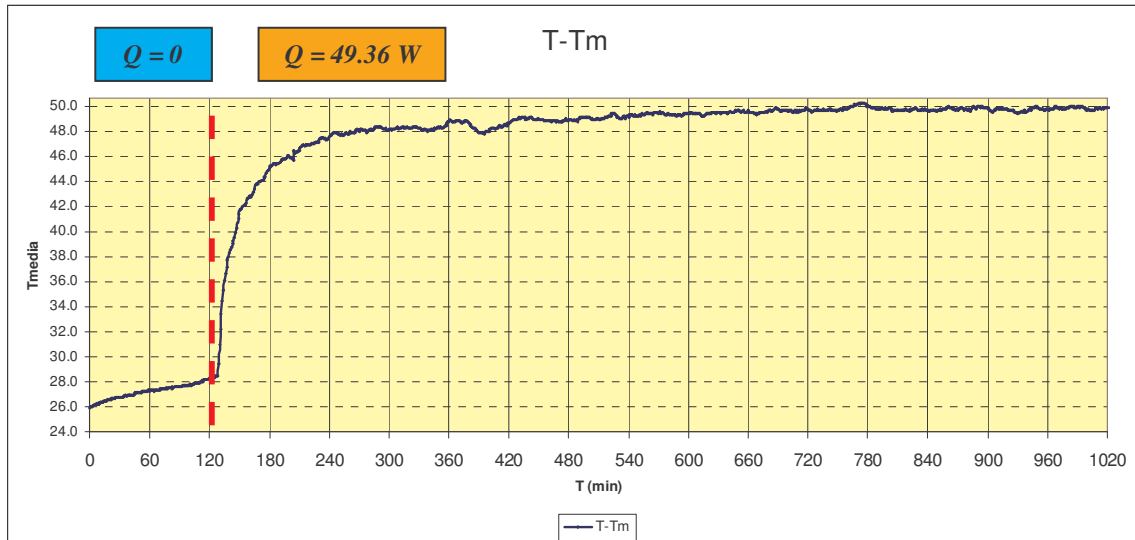


Fig 09.- Evolución de la temperatura media del fluido

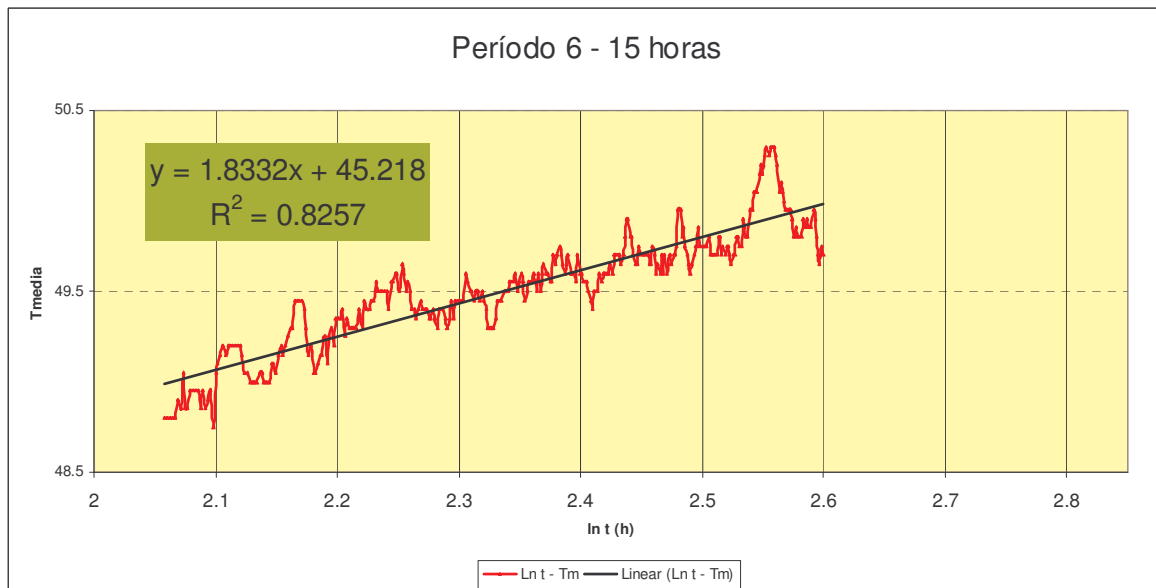


Fig 10.- Grafica de la media de temperatura del fluido frente al logaritmo neperiano del tiempo. Tramo de evaluación

5.3 Valores de conductividad obtenidos

Aplicando las ecuaciones del modelo de foco lineal descritas anteriormente, los valores obtenidos son los siguientes:

Método de	λ (W/m ² K)	Rb (m ² K/W)
-----------	--------------------------------	-------------------------

evaluación		
Foco lineal	2.132	0.378

5.4 Discusión de los resultados

Las características estratigráficas del subsuelo perforado corresponden a un suelo limo-arcilloso, con predominancia de arcilla en los 4 metros finales. La altura del nivel freático se sitúa a 6 metros de profundidad.

Para este tipo de suelos, la bibliografía apunta los siguientes valores:

Referencia	Clase textural	λ (W/m²K)	Difusividad térmica (cm²/s)
Epri Manual [2]	Arcilla plástica	1.11	0.0054
	Arcilla saturada	1.77	0.066
Chiasson [13]	Arcilla	0.85-1.10	0.0028-0.0036
	Limos	1.50-3.30	0.00704 - 0.00825

El valor de conductividad obtenido es superior al tabulado para arcillas, pareciéndose incluso más al valor de Limos. La presencia de un nivel freático tan superficial y estático aumenta el valor natural del material del suelo, permitiéndole transferir más calor de la fuente al suelo (modo refrigeración) o del suelo a la fuente (modo calefacción).

Cabe señalar que el sistema de inyección de calor diseñado para el test realizado se vió afectado durante el test por las variaciones exteriores de temperatura (oscilaciones térmicas muy altas en las horas de realización del test), lo que impide una mayor precisión en la recta de ajuste, si bien la tendencia es clara en varios períodos del test (5 horas en adelante) resultando en valores similares de conductividad y resistividad térmica del subsuelo.

5. CONCLUSIONES

El test de respuesta térmica se muestra como la herramienta más eficaz para estimar las propiedades térmicas del subsuelo orientadas al diseño de un sistema de climatización geotérmico. La bibliografía muestra como sistemas de este tipo se desarrollan en los países de mayor tradición en la utilización de bombas de calor geotérmico. Esta propiedad es fundamental para la optimización del diseño, en especial los pozos de intercambio geotérmicos que es la parte más costosa del sistema geotérmico.

La prueba consiste en la inyección constante de un pulso de calor al subsuelo mediante una tubería enterrada, midiendo la respuesta en la temperatura del fluido que se va produciendo con el tiempo. Varios modelos matemáticos aproximan los valores de conductividad térmica ($W/m^2\text{°K}$) y resistividad térmica ($m^2\text{°K/W}$), siendo el más fiable y más utilizado el método del foco lineal de Mogersen.

En el Campus de la UABC, en Mexicali, se ha diseñado y construido un test de respuesta térmica sobre una perforación de 11 metros de profundidad realizada por medios autónomos. El test construido sigue las especificaciones de los investigadores principales de este tipo de equipos, tratando de simular en todo momento el funcionamiento de una bomba de calor geotérmico.

Se han realizado varios monitoreos del subsuelo, reflejando en el presente artículo el de mejor resultado obtenido, con una duración de 15 horas y una inyección de calor de 49.36 W/m.

Realizado el tratamiento de los datos, se obtiene un valor de conductividad térmica de 2.132 ($W/m^2\text{°K}$) y una Resistividad térmica de 0.378. Los valores obtenidos son superiores a los reflejados en la bibliografía. Esto puede ser debido al alto porcentaje de limos existentes en el suelo y la presencia de un nivel freático muy superficial y estanco, que permite la transferencia de calor por convección en el subsuelo.

De los resultados obtenidos se deduce que el subsuelo de Mexicali, con una temperatura estable de 25°C, puede utilizarse como sumidero de calor mediante un pozo de intercambio geotérmico. Aplicando los valores obtenidos, sería posible disipar 21.32 W por metro de pozo considerando una temperatura mínima en la tubería de retorno de 30°C (5 grados pinch) y un fluido de entrada con una temperatura de 40 °C.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Austin, W., 1998. *Development of an In-situ System for measuring Ground Thermal Properties*. MS thesis, OSU, Stillwater OK.
- [2] Electric Power Research Institute EPRI, 1989. *Soil and Rock Classification for the Design of Ground- Coupled Heat Pump Systems—Field Manual*. Special Report, EPRI CU-6600.
- [3] Gehlin, S., 2002. *Thermal Response Test. Method, development and evaluation*. PhD Thesis. 2002:39 ISSN 1402. Department of Environmental Engineering. Lulea University of Technology. Suecia.
- [4] Sundberg, J., 1988. *Thermal properties of soils and rocks*. PhD Thesis A57. Department of Geology. Chalmers Technical University. Goteborg, Suecia.
- [5] Mogensen, P., 1983. *Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages*. Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice pg.652-657. Swedish Council for Building Research.
- [6] Georgiev, A., A. Busso, A., Roth, P., Barraza, P., 2004. *First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America*. *Renewable Energy* 29 1947-1963.
- [7] Georgiev, A., A. Busso, A., Roth, P., 2006. *Shallow borehole heat exchanger: Response test and charging-discharging test with solar collectors*. *Renewable Energy* 31 971-985.
- [8] Gehlin, S.; Hellström, G., 2003. *Comparison of four models for thermal response test evaluation*. *ASHRAE Transactions* 2003, Vol. 109, Pt. 1.
- [9] Ingersol, L.R., Plass, H.J., 1948. *Theory of the ground pipe heat source for the heat pump*. *ASHVE Transactions* vol. 54 p. 339-348.
- [10] Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of heat in solids*. Second ed. Oxford University Press. Reino Unido.
- [11] Steinmann, G., Laloui, L., 2005. *Thermal response tests: in situ determination of geothermal characteristics of soils*. Soil Mechanics Laboratory, EPFL, Lausanne, Switzerland. *International Geothermal Association News* 62, October - December 2005.
- [12] Sanner, B., Russ, M., Mands, E., Muller, J., 2000. *Thermal*

- Response Test: Experiences in Germany. UbeG. Germany
- [13] Chiasson, A., S.J. Rees, Spitler, J.D., 2000. A preliminary assessment of the effects of ground-water flow on closed-loop ground source heat pump systems. ASHRAE Transactions. 106(1):380-393.

XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales
Oviedo, 7 a 11 de Octubre de 2007

Caracterización de las aguas minerales y termales en el entorno del río Miño a su paso por la ciudad de Ourense

José Miguel Fernández Portal¹, María del Mar Corral Lledó², Pedro Araujo Nespereira³, José Ángel Cid Fernández⁴

¹ Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. IGME, Cardenal Payá 18, 1º, 15703 Santiago de Compostela (A Coruña). jm.fernandez@igme.es

² Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. IGME, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid. mm.corral@igme.es

³ Dpto. Geociencias Marinas y Ordenación del Territorio. Universidad de Vigo. As Lagoas s/n, 32004 Ourense. araujo@uvigo.es

⁴ Dpto. Ingeniería de los recursos naturales y medio ambiente. Becario MAE-AECI UABC, México. Universidad de Vigo. As Lagoas s/n, 32004 Ourense. jcid@uvigo.es

Palabras clave: Aguas minerales, termalismo, Ourense.

1. Introducción

En este trabajo se expone parte de los resultados del proyecto suscrito como convenio de colaboración entre la Consellería de Innovación e Industria de la Xunta de Galicia y el Instituto Geológico y Minero de España consistente en un estudio para la mejora del

conocimiento científico-técnico de las aguas minerales de esta Comunidad (Baeza y Corral-Lledó, 2004). Así mismo se ha contado con la colaboración del Departamento de Geociencias Marinas y Ordenación del Territorio de la Universidad de Vigo en el apartado del estudio de fracturación y parte del inventario de puntos de agua. La zona de estudio se enmarca en un área de unos 9 km², aguas abajo del río Miño a su salida de la ciudad de Ourense, en la que el concello ourensano está realizando importantes inversiones a través de su Plan Estratégico Termal y de Dinamización Turística el cual ha servido para recuperar varias zonas termales como espacios de uso público, así como para iniciar diversos estudios de cara a una evaluación del potencial termal de dicho sector.

Debido a la importancia y número de manifestaciones termales que existen en la zona, así como al interés que está mostrando la administración y los particulares, por la ordenación y explotación del recurso hidromineral y termal que subyace en el área, se ha elegido este tramo del río Miño para realizar una caracterización de dichas aguas.

1.2. Metodología

En primer lugar se procedió, durante varios días de campo, a un reconocimiento geológico e hidrogeológico del terreno, haciendo énfasis en el apartado de fracturación de la roca. Se establecieron varias estaciones de medidas de fracturación y se elaboró un mapa geológico

a escala 1:25.000 de la zona, según los datos de campo recogidos y anteriores mapas de distintos proyectos y publicaciones, así como un mapa de fracturación detallado.

En segundo lugar se ha realizado un completo inventariado de los puntos de agua, tanto termales como frías, existentes en la zona, recogiendo su situación, características técnicas, usos actuales, instalaciones de aprovechamiento y reportaje fotográfico. Junto o ello y en parte de los puntos encontrados, se han medido algunos parámetros in situ tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y caudal.



Figura 1. Recogida de muestras en Chavasqueira.

En tercer lugar se procedió a la toma de muestras (Figura 1) de 15 de los manantiales y sondeos inventariados. El muestreo para el análisis de 50 parámetros consistió en la recogida de agua termal en distintos recipientes y su conservación con distintos compuestos (Tabla 1), las muestras se conservaron en ambiente refrigerado, se etiquetaron y embalaron para ser enviadas a los laboratorios de Tres Cantos del IGME.

Por último se ha realizado el trabajo de gabinete en el que se ha procedido al estudio e interpretación de los datos recogidos, así como al análisis de los resultados de las muestras de aguas minero-medicinales recogidas.

Tabla 1. Metodología de muestreo.

PARÁMETROS	FRASCO	CANTIDAD	CONSERVANTES
Cationes y aniones mayores y otros	Plástico	3 litros	Sin conservantes
Metales pesados y elementos traza	Plástico	0,5 litros	Filtrado y con HNO ₃
Cianuros	Plástico	0,5 litros	NaOH
Sulfuros	Plástico	0,5 litros	Acetato de Zn y NaOH
Detergentes	Vidrio borosilicatado con tapón de teflón	0,5 litros	Sin conservantes
Fenoles	Vidrio borosilicatado con tapón de teflón	0,5 litros	H ₂ SO ₄
Carbono Orgánico Total (COT)	Vidrio ámbar con tapón de teflón	0,1 litros	Sin conservantes

1.2. Situación geográfica

El trabajo se ha desarrollado en un sector del cuadrante noroccidental de la provincia de Ourense (Figura 2), estando casi la totalidad de la zona dentro del término municipal del Concello de Ourense, y una pequeña parte en los de los Concellos de Barbadás y Toén.



Figura 2. Mapa de Galicia y área de estudio.

La topografía de la zona se caracteriza por un encajamiento del río Miño del orden de unos 270 metros, siendo la margen izquierda más abrupta y con mayor porcentaje en pendiente que la margen derecha. En el contacto entre la ruptura de la pendiente y el propio río existe un área de transición plana y con poco desnivel que corresponde en su mayor parte con terrazas fluviales formadas por la acción erosiva del río. Las zonas altas, tanto del sector Norte como hacia el Sur, disponen de poco desnivel topográfico en las que, favorecidos por esta característica, se han instalado pequeños núcleos urbanos y casas de campo. Las cotas del terreno se sitúan entre los 90 metros de la parte más baja del río Miño, hasta los 453 metros del vértice Castro de Beiro (Figura 3).

Esta disposición topográfica obliga a que las vías de comunicación e infraestructuras derivadas se dispongan en la zona más cercana al río siendo ésta, como ya se ha indicado, la de menor topografía y donde, además, se concentra la totalidad de las manifestaciones termales. En torno a estas vías de comunicación, tales como la A-52, N-120, ferrocarriles y carreteras comarcales, se han establecido numerosas empresas y naves, algunas agrupadas en polígonos, así como varios núcleos de población, y otras

infraestructuras derivadas como cementerios, depuradoras, colegios o áreas recreativas. Por todo ello la zona que más interés tiene para el estudio de estas surgencias es a la vez una zona muy urbanizada y con un gran número de obras civiles de gran envergadura (Figura 4).

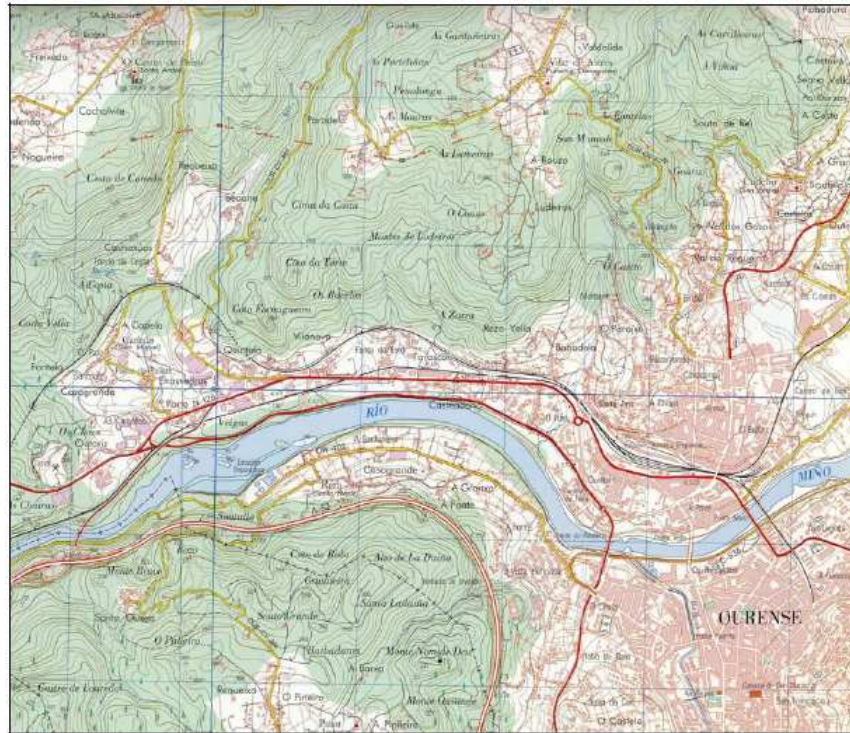


Figura 3. Mapa topográfico de la zona de estudio y principales vías de comunicación (escala modificada).



Figura 4. Pasarela peatonal que ha afectado a los manantiales de Outaríz.

Como ya se ha indicado en el párrafo anterior las zonas llanas o de escasa pendiente, cercanas al río Miño, se encuentran ocupadas casi en su totalidad por importantes vías de comunicación a lo largo de las cuales se vertebra una importante cantidad de naves industriales, casas de campo, huertas y pequeños núcleos urbanos que humanizan de forma considerable el paisaje en torno al río. Por otro lado las superficies de mayor pendiente correspondientes a terrenos montañosos se encuentran ocupadas por una masa forestal variada que combinan los pinares y frondosas con matorral, y que sufrió un importante incendio forestal en la margen derecha del río Miño durante el verano de 2006. Por último, y en zonas superiores a los 350 m, se produce una suavización del relieve que es rápidamente aprovechada para la construcción de pequeños núcleos rurales dispersos con terrenos de cultivo alrededor junto con chalets y casas de campo que alternan con formaciones graníticas como berrocales y penedos.

1.3. Marco geológico

La mayor parte de la zona estudiada se encuentra formada por rocas graníticas que intruyeron en el Dominio Esquistoso de la Zona de Galicia-Tràs-os-Montes (Figura 5). En total podemos encontrar cinco litologías claramente diferenciables:



Figura 5. Zona de estudio marcada sobre mapa geológico MAGNA (escala modificada).

1.3.1. Esquistos con metamorfismo de contacto

Se trata de afloramientos de pequeña extensión de esquistos micáceos y cuarcíticos que forman la parte basal del Dominio Esquistoso de Galicia-Tràs-os-Montes, denominado Grupo Santabaia, y con una edad comprendida entre el Precámbrico al Ordovícico Inferior. El marcado carácter vulcanosedimentario de este Grupo no se observa en los afloramientos estudiados debido al metamorfismo térmico de contacto causado por los cuerpos graníticos, tanto sincinemáticos como postcinemáticos, que intruyen en él. Los afloramientos, que rebasan la isograda de la sillimanita, suelen estar migmatizados presentando ligeros bandeados de cuarzo, feldespato y plagioclasa que alterna con bandas micáceas más oscuras (Figura 6). Junto a ello, la presencia de biotitas sin orientación es un indicativo más del efecto térmico de las intrusiones graníticas.



Figura 6. Esquistos bandeados migmatizados.

1.3.2. Rocas Graníticas Hercínicas Sincinemáticas

La mayor parte de la superficie de la zona está ocupada por este tipo de rocas, aflorando en todo el sector Norte y en mitad de la ladera izquierda del Miño. El principal grupo representado en la zona es el de los granitos peraluminicos de dos micas y moscovíticos, los cuales intruyen en los esquistos del Grupo Santabaia resultando unos contactos muy difusos, en los que se alternan bandas de granito con gneises migmatíticos, siendo frecuentes los enclaves de esquistos y gneises. Estos granitos están estrechamente ligados al metamorfismo ya que suelen aparecer en la isograda de la sillimanita y en zonas de migmatización. La roca es de color claro con tamaños de grano medio a grueso y textura por lo general hipidiomorfa presentando frecuentemente filones de aplitas y pegmatitas. Se

podrían diferenciar dos tipos distintos de granitos dentro de este grupo no siempre bien cartografiados debido a la complejidad para delimitar sus bordes:

- Granitos de dos micas moderadamente leucocráticos

En ellos son frecuentes los enclaves de rocas metasedimentarias ya que se suelen situar en contacto con la roca de caja esquistosa, además existen inyecciones concordantes con la esquistosidad que a escala de afloramiento da unos contactos netos e intrusivos, extendiéndose en anchas bandas difícilmente delimitables en cartografía. La proporción de biotita suele ser mayor o igual que la de moscovita, aún así existen facies, en transición a granitos muy leucocráticos, en las que esta relación se invierte.

- Granitos de dos micas muy leucocráticos

De forma general aparecen en las zonas centrales de los grandes afloramientos de granitos de dos micas que, junto con una mayor riqueza en cuarzo, provoca que los afloramientos sean más resistentes a la erosión situándose en los relieves más altos, y formando penedos como en el caso de la ladera derecha del Miño del área de estudio. Los contactos con los granitos anteriores son difusos e imprecisos desarrollando en muchas ocasiones la facies “Ala de Mosca” (Figura 7) que se caracteriza por un mayor crecimiento de los cristales de biotita y un tamaño de grano grueso.



Figura 7. Granito facies “Ala de Mosca”.

1.3.3. Rocas Graníticas Hercínicas Postcinemáticas

En esta zona aflora granitos y granodioritas biotíticas pertenecientes al grupo de los granitoides calcoalcalinos y subalcalinos, situándose los principales afloramientos en el sector Sur de la zona de estudio. Esta granodiorita constituye el extremo norte del Macizo

de Orense el cual aparece de forma intrusiva en los esquistos infraordovícicos y en los granitos sincinemáticos de dos micas descritos con anterioridad, creando una importante aureola de metamorfismo de contacto con bordes netos y definidos. La geometría del macizo es concéntrica y algo zonada aflorando en la área de estudio dos facies: la más exterior caracterizada por un tamaño de grano medio con megacrystales de feldespato potásico y por la presencia de enclaves esquistosos, corneanas y microagregados biotíticos; por otro lado la zona intermedia de grano grueso porfídico y textura inequigranular con mayor densidad y tamaño de megacrystales.

1.3.4. Depósitos Cuaternarios

Los afloramientos correspondientes a esta edad se encuentran en torno al cauce del río Miño, en la zona de ruptura de pendiente de las laderas, así como en zonas llanas o de escasa pendiente. Se trata de depósitos sedimentarios, procedentes de un ambiente continental, de escasa potencia y continuidad lateral, pero que en la zona de estudio llegan a ser cartografiables. Se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Terrazas fluviales

Aunque en la zona de estudio el río Miño se encuentra relativamente encajado en los granitos y granodioritas, éste ha podido formar varios depósitos de cantos rodados, gravas, arenas y arcillas, formando hasta tres niveles de terrazas identificables a unos aproximadamente 4-10, 20-30 y 30-35 m., respectivamente, sobre el cauce (*Araujo-Nespereira y Seara-Valero, 1993*). Presenta forma tabular y superficie plana originando morfologías escalonadas observables en esta zona del Miño. Estos depósitos se encuentran, en algunos sectores, afectados por una serie de fallas indicativo de una tectónica reciente que probablemente influye en los numerosos manantiales de aguas minerales existentes en los alrededores.

- Coluviones

Se trata de depósitos de aspecto masivo, caótico y sin ordenamiento interno, compuestos por cantos angulosos y matriz arcillosa que se disponen sobre las laderas graníticas y actúan a modo de transición entre las zonas altas de mayor pendiente y las zonas llanas del valle. Suelen ser de escasa potencia y moderada extensión superficial, estando formadas por el acúmulo y alteración de material procedente de los relieves superiores más abruptos del macizo granítico.

- Depósitos aluviales

Consisten en una serie de depósitos que se disponen a lo largo y entorno a los principales cauces fluviales, estando formados por bolos, gravas y arenas de litologías cuarzosas y graníticas, con espesores pequeños; estas zonas suelen estar ocupadas por prados y casas con huertas y topográficamente tienen una pendiente algo superior a los depósitos de terrazas.

- Depósitos eluviales

Se trata de sedimentos de origen edáfico que se forman por la alteración actual de la roca formando depósitos areno-arcillosos, en este grupo se incluyen las arenizaciones o lo que se conoce como “xabres”, los cuales pueden llegar a tener cierta importancia local debido a su extensión o penetración en profundidad, pero que en ningún caso han constituido elementos cartografiables a la escala de trabajo.

2. Fracturación.

En un sustrato cristalino, con una bajísima porosidad primaria como el que conforma las riberas del río Miño a su paso por la ciudad de Ourense, la red de fracturas juega un importante papel en la filtración, circulación y almacenaje de las aguas subterráneas y, dentro de ellas, las aguas termales en particular.

Para comprender esta relación se ha realizado un estudio sobre este área de la macrofracturación sobre foto aérea y satélite así como, en diferentes estaciones, a escala de afloramiento, representando los resultados en un diagrama de rosas (Figura 8) y en una ortofoto de la zona (Figura 10).

Las direcciones principales de fracturación presentes en el área corresponden a las direcciones N 35° E y N 120° E y, en menor medida, aparecen también representadas las direcciones N 5° E y N 60° E. Dichas direcciones son coincidentes con las principales lineamientos definidos para el Antepais Ibérico (*De Vicente, G. et al., 2004*) las cuales han sufrido una reactivación importante en tiempos recientes.

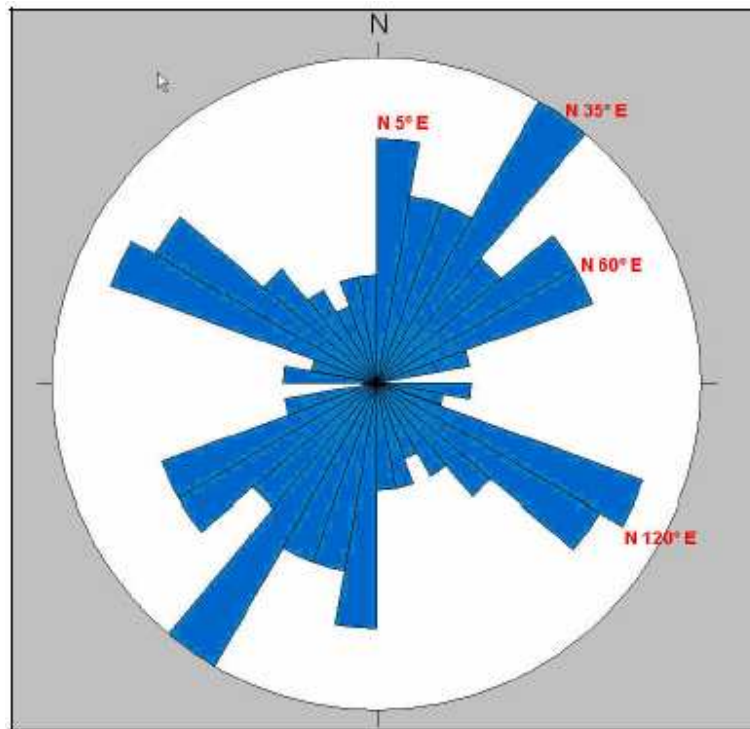


Figura 8. Diagrama de rosas de la fracturación en la ciudad de Ourense.

La importante actividad sísmica en el Noroeste peninsular en los últimos años ha propiciado el desarrollo de estudios en la definición del tensor de esfuerzos activo (González-Casado 2000, Rueda 2001). Este tensor confirmaría una importante componente compresiva en la dirección NO-SE y de carácter distensivo según la dirección NE-SO.

En estudios de detalle se aprecia la relación directa del afloramiento de esta agua con la familia de dirección N120° E, tanto en el análisis de la fracturación a escala de afloramiento como en la prospección eléctrica (SEV) llevada a cabo en el área de Eirasvedras (Oeste de la ciudad de Ourense), reflejando el carácter distensivo de estas direcciones. Si bien las fracturas de carácter más nortado, y por lo tanto con un marcado carácter compresivo, también se relacionan con el mecanismo de surgencia de las aguas pero jugando un papel diferente al actuar como barreras, o parapetos, al limitar la dirección principal de circulación obligando al agua a su surgencia.

Por otro lado, y en la confirmación de este dinamismo, la “hoya” de Ourense representa un valle con una marcada componente estructural puesta de manifiesto en la morfología que presenta y con una actividad neotectónica reciente observable, entre otros fenómenos, en el basculamiento de niveles de terrazas fluviales (Figura 9) afectadas por planos de fractura EW.



Figura 9. Basculamiento del tercer nivel de terraza del río Miño. Zona de A Ponte.

3. Inventario de puntos de agua termal

Uno de los aspectos tratados en el estudio ha sido la actualización de la base de datos de puntos de agua de la zona de estudio, centrándose en la búsqueda de surgencias y sondeos con aguas minerales y termales. Para ello se ha procedido a la revisión de las bases de datos centrales del IGME (IGME inéditos, 1980, 1982, 1984, 1986), así como una revisión bibliográfica de las publicaciones y estudios hidrogeológicos previos que sobre aguas minerales existen de la zona (Ferrero-Arias, 2000 y 2004; Geomecánica y Aguas 1995; Galdo, 1995), completándose con un minucioso trabajo de campo para la búsqueda de nuevos puntos de aguas termales.

En cada uno de los puntos inventariados, estuvieran o no descritos con anterioridad, se han realizado las siguientes actuaciones:

- Localización en foto aérea escala 1:5.000 y mapa topográfico escala 1:25.000.
- Cumplimiento de ficha de datos (denominación, coordenadas UTM, titular, explotador, instalaciones de aprovechamiento, uso, croquis, etc.).
- Valoración del riesgo de contaminación.
- Reportaje fotográfico.
- Toma de medidas in situ (temperatura, conductividad, pH, oxígeno en mg/l y %)
- Recogida de muestras para análisis de detalle, en los casos adecuados.

Se han podido situar algo más de cincuenta puntos (Tabla 2) en los que existen o existieron manantiales y sondeos de aguas minero-medicinales y termales, quedando aún algunos lugares en los que sabiendo de la existencia de estos indicios, no se ha podido comprobar quedando algunos de los puntos con datos sin confirmar. Del total inventariado

se han recogido muestras para análisis en 15 puntos, los cuales reunían ciertas condiciones de muestreo que garantizaban la calidad y cantidad de la muestra para el futuro análisis.

Las coordenadas de cada punto se han representado en una ortofoto (Figura 10) en el cual se observa la concentración de puntos en torno a dos o tres áreas, principalmente Chavasqueira y Outaríz-Muiño, donde la cantidad de surgencias y obras de captación de aguas termales son elevadas.



Figura 10. Fracturación e inventario de puntos de agua sobre ortofoto del terreno.

Tabla 2. Inventario de puntos de agua termal.

NÚMERO	TOPÓNIMO	NATURALEZA	USO	OBSERVACIONES
1	Auto Industrial	Sondeo	Limpieza de instalaciones	No confirmada su existencia
2	Caldas de Santiago I	Manantial	Baños y bebida	Restos del balneario inactivo hace más de 30 años
3	Caldas de Santiago II	Manantial	Baños y bebida	Restos del balneario inactivo hace más de 30 años
4	Caldas de Santiago III	Manantial	Baños y bebida	Restos del balneario inactivo hace más de 30 años
5	Casa Ana	Manantial	Baños privados y riego	Hasta hace 5 años se ofrecía como baños y lavadero de ropa
6	Chavasqueira (Jardín)	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformada hace 4 años
7	Chavasqueira (Pozas)	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformada hace 4 años
8	Chavasqueira (Río)	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
9	Chavasqueira (Sauna)	Manantial	Baños en termas públicas de concesión privada	Manantial captado a través de un pozo de unos 3 m y 90 mm
10	Gasolinera O Pino	Sondeo	Lavado de vehículos	Sondeo sellado hace 5 años
11	IGME 1	Sondeo	Investigación, actualmente sellado	Sondeo de 1948 testificado de 290 m
12	IGME 2	Sondeo	Investigación	Sondeo de 1984 que supuestamente aún se utiliza
13	IGME 4	Sondeo	Investigación y abastecimiento no urbano	Sondeo de 1984 testificado de 700 m, instalado con bomba
14	IGME 5	Sondeo	Investigación, actualmente sellado	Sondeo de 1984 testificado de 291 m
15	Muiño (Fonte)	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformada a principios de 2007
16	Muiño (Pozas)	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformado a finales de 2006
17	Outariz Alta I	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformado a principios de 2006
18	Outariz Alta II	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformado a principios de 2006
19	Outariz Baja	Manantial	Baños en pozas públicas	Reformado a mediados de 2007
20	Outariz Río	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
21	Pozo Alfombras	Sondeo	Limpieza de textiles	Sondeo de 140 m y 140 mm
22	Pozo Aluminio	Sondeo	Abastecimiento no urbano	Sondeo de 75 m y 180 mm
23	Pozo Antonio I	Sondeo	Riego de jardín	Sondeo de 15 m y 150 mm
24	Pozo Antonio II	Sondeo	Riego de jardín y piscina	Sondeo de 30 m y 150 mm
25	Pozo Artacho	Sondeo	Riego de huerta	Sondeo de 100 m y 220mm

26	Pozo Matadero I	Sondeo	Limpieza de instalaciones	Sondeo sellado hace años
27	Pozo Matadero II	Sondeo	Limpieza de instalaciones	Se derrumbó hace 1 año por falta de entubación
28	Pozo Matadero III	Sondeo	Limpieza de instalaciones	Sondeo de barrena 125 m
29	Pozo Outariz I	Sondeo	Baños en termas públicas de concesión privada	Sondeo de >50 m y 150 mm
30	Pozo Outariz II	Sondeo	Baños en termas públicas de concesión privada	Sondeo de >50 m y 250 mm
31	Pozo Sergio	Sondeo	Riego de huerta	Sondeo de 49 m con mezcla de aguas frías
32	Reza (Fonte)	Manantial	Baños y bebida	Reformada a principios de 2007
33	Reza (Río)	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
34	Tinteiro (Fonte)	Manantial	Baños y enjuagues	Muy frecuentada su última reforma es de 1994
35	Tinteiro (Río)	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
36	Pozo Maimón	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
37	Tinteiro Alta	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
38	Reza 2	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
39	Chavasqueira Baja	Manantial	Sin uso	El agua surge y se pierde en el cauce del río Miño
40	Ponte Ribeirido	Sondeo	Riego y abastecimiento	Valores altos de conductividad y temperatura
41	IGME Los Remedios	Sondeo	Investigación	Sondeo de 1984 sellado posteriormente
42	Rúa Feira Nova 3	Pozo artesano	Riego de huerta	Indicios de termalidad
43	Pozo Torreal Reza	Pozo artesano	Riego de huerta	Valores altos de conductividad
44	Rúa do Tinteiro 4	Sondeo	Riego y abastecimiento	Valores altos de conductividad
45	Rúa do Tinteiro (almacén)	Sondeo	Uso industrial	Valores altos de conductividad
46	Rúa do Tinteiro 3	Pozo artesano	Riego de huerta	Valores altos de conductividad
47	Rúa do Tinteiro 2	Pozo artesano	Riego de huerta	Valores altos de conductividad
48	Rúa Feira Nova 2	Pozo artesano	Riego de huerta	Indicios de termalidad
49	Reza 5B	Sondeo	Riego y abastecimiento	Valores altos de conductividad y temperatura
50	Reza 5A	Sondeo	Riego y abastecimiento	Valores altos de conductividad y temperatura
51	Vista Hermosa 3	Sondeo	Riego y abastecimiento	Indicios de termalidad

52	Casa de Ejercicios	Sondeo	Riego y abastecimiento	Sondeo con temperatura hipotermal
53	Vista Hermosa 4	Pozo artesano	Riego de huerta	Valores altos de conductividad

4. Caracterización hidroquímica

Los distintos manantiales y sondeos que se han medido, en lo que a parámetros in situ se refiere, han arrojado temperaturas por lo general hipertermales las cuales superan ampliamente los 45° C. Se pueden establecer dos zonas de surgencia principal (*Fernández-Portal y Corral-Lledó, 2006*), por un lado la zona de Outariz-Muñio, situada al Oeste, que registra las mayores temperaturas, llegando a los 68° C en el punto n° 8 (Muñio) y superando los 60° C en algunas de las surgencias n° 9 y 11 (Outariz). Por otro lado destaca la zona Este, cuyas temperaturas se sitúan entre los 45 y los casi 60° C de los puntos n° 5 y 7 (Chavasqueira). Entre ambos sectores no existen surgencias ni sondeos con marcados indicios termales.

Se puede asegurar que las temperaturas más altas aparecen relacionadas sobre todo con manantiales y surgencias; en el caso de los sondeos la mala ejecución y conservación de éstos provoca que las aguas en un principio hipertermales sufran mezcla con aguas frías de los pequeños acuíferos cuaternarios superficiales, con lo que la composición y la temperatura varían de forma notoria (Tabla 3), esto no impide que alguna obra bien ejecutada permita obtener buenos caudales y temperaturas como el caso de los puntos n° 12, 13 y 16.



Figura 11. Surgencias difusas en el cauce del río Miño.

En lo que respectan a las medidas de pH los valores más altos se dan sistemáticamente en los distintos manantiales independientemente de su temperatura, mientras que en los sondeos las conductividades suelen ser más bajas pudiéndose achacar

de nuevo a las malas ejecuciones de las obras que permiten la mezcla de distintas tipologías de aguas en la columna del sondeo.

Las medidas de conductividad eléctrica, situadas entre 400 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indican valores normales para este tipo de aguas y en casi todos los puntos muestreados; por debajo de estos niveles se encuentran los pozos n° 18, 19 y 20, interpretado de nuevo como mala actuaciones en las obras de captación que pudiera provocar mezcla de otro tipo de aguas. Por otro lado la medida n° 6 muestra valores bajos por haber sido realizada en el mismo cauce del río Miño, tan solo la temperatura hipotermal, los vapores y la salida de gases en la zona indicaban la presencia de importantes surgencias entre la barra aluvial de esta zona del cauce (Figura 11).

Los parámetros de oxígeno disuelto, tanto en mg/l como en porcentaje, no se pudieron determinar en muchos de los casos debido a que las altas temperaturas del agua, por encima de 45°C , afectaban al rango de sensibilidad del aparato modificando cualquier lectura y dañando las membranas de los sensores. Junto a ellas las medidas de caudal no llegan a ser totalmente representativas debido a la dificultad para estimar caudales en sondeos privados así como para realizar aforos en manantiales cuyos ámbitos de surgencia se extienden dentro de la zona inundada por el río, dificultando las estimaciones más objetivas.

Entre los puntos 26 y 35 las medidas de temperatura no indicarían necesariamente la existencia de aguas minerales o de origen termal, pero en éste caso las medidas de conductividad eléctrica presentan valores acordes con las aguas minerales de posible origen termal, que en un principio parecen surgir a través de los sedimentos cuaternarios que cubren en esta zona el granito. En el ascenso el agua pierde su temperatura sin casi modificar sustancialmente su cantidad de iones disueltos, con lo que se puede asegurar que bajo la zona pueden existir importantes focos de surgencia de agua mineral y termal.

Tabla 3. Medidas *in situ* de parámetros inestables en algunos de los puntos termales.

Nº	TOPÓNIMO	Tª agua (°C)	pH	C.E. (µS/cm)	O ₂ dis. (mg/l)	O ₂ dis. (%)	Caudal (l/s)
1	Caldas de Santiago I	40,3	8,26	463	0,28	4,1	0,14
2	Caldas de Santiago II	38,5	8,19	469	0,38	8,1	0,06
3	Caldas de Santiago III	27,8	7,64	443	0,76	9,4	0,02
4	Casa Ana	45,0	8,16	630	ND	ND	0,20
5	Chavasqueira (Jardín)	48,1	8,03	527	ND	ND	0,20
6	Chavasqueira (Río)	20,7	7,85	137	ND	ND	ND
7	Chavasqueira (Sauna)	59,7	7,40	615	ND	ND	<1
8	Muiño (Fonte)	68,6	8,25	491	ND	ND	<1
9	Outariz Alta I	60,0	7,84	625	ND	ND	0,70
10	Outariz Alta II	54,5	8,43	620	ND	ND	0,30
11	Outariz Baja	61,0	7,33	635	ND	ND	3,00
12	Pozo Alfombras	49,4	7,49	617	ND	ND	0,5-1
13	Pozo Aluminio	60,8	7,66	493	ND	ND	0,5-1
14	Pozo Antonio I	26,7	6,68	546	ND	ND	0,5-1
15	Pozo Antonio II	31,1	7,23	563	0,11	2,0	0,5-1
16	Pozo Artacho	56,4	7,92	475	ND	ND	3,00
17	Pozo Matadero III	40,5	7,62	459	2,64	39,1	1,50
18	Pozo Outariz I	41,0	6,33	305	0,88	10,5	2,00
19	Pozo Outariz II	39,9	6,15	298	0,96	14,1	0,50

20	Pozo Sergio	33,0	5,77	125	0,41	6,0	0,5-1
21	Reza (Fonte)	29,5	8,29	485	0,31	3,8	<0,5
22	Reza (Río)	32,3	8,23	478	ND	ND	ND
23	Tinteiro (Fonte)	45,8	8,33	463	0,28	4,6	0,20
24	Pozo Maimón	55,0	ND	ND	ND	ND	ND
25	Ponte Ribeirido	31,0	ND	504	ND	ND	ND
26	IGME Remedios	56,0	ND	ND	ND	ND	ND
27	Pozo Torreal Reza	13,7	ND	457	ND	ND	ND
28	Rúa Tinteiro 4	14,5	ND	569	ND	ND	ND
29	Rúa Tinteiro (almacén)	15,2	ND	563	ND	ND	ND
30	Rúa Tinteiro 3	14,2	ND	406	ND	ND	ND
31	Rúa Tinteiro 2	15,1	ND	455	ND	ND	ND
32	Reza 5B	19,4	ND	473	ND	ND	ND
33	Reza 5A	19,4	ND	473	ND	ND	ND
34	Casa Ejercicios	23,3	ND	282	ND	ND	ND
35	Vista Hermosa 4	14,4	ND	731	ND	ND	ND

Del total de puntos termales inventariados, se seleccionaron 15 en los que la toma de muestras se podía hacer con ciertas garantías, en lo que a representatividad frente a la mezcla de aguas se refiere. En estos manantiales y sondeos se recogieron distintas cantidades de agua y se procedió a su conservación con distintas sustancias (Tabla 1). Los análisis realizados consistieron en un total de 50 parámetros entre los que se encuentran elementos mayoritarios para la clasificación hidroquímica de la muestra, elementos minoritarios, metales y distintos parámetros para detectar algún tipo de contaminación antrópica o concentraciones naturales de elementos potencialmente peligrosos.

En la Tabla 4 exponen los resultados de los análisis para elementos mayoritarios e indicadores termales. La facies hidroquímica de los distintos puntos analizados, muestran un marcado carácter bicarbonatado sódico, fluorurado con elevados contenidos de B, lo que confirma, una vez más, el origen termal de este recurso. Tan solo la muestra número 8 indica una facies bicarbonatada sulfatada sódica en la que los parámetros termales, tales como el F, B y SiO₂, presenta bajas concentraciones, por lo que podría ser excluido como recurso hidromineral de no ser por la temperatura de 33° C que alcanza el agua a la salida del sondeo. Por otro lado, cuando el sulfhídrico se presenta, lo hace en cantidades importantes, pudiendo decir que la facies es además sulfurada como en los casos de las muestras n° 5, 6, 9 y 12.

En lo que respecta al resto de parámetros analizados, algunos de ellos indican concentraciones elevadas de elementos tales como el As, lo cual no es extraño en este tipo de aguas cuya roca almacén granítica suele ser la fuente de dicho elemento, así como el amoníaco. Estos valores se tendrán en cuenta para los casos en los que el agua sea ingerida tanto en fuentes públicas como en sondeos de uso privado, no afectando al uso

balnoterápico. No se han detectado niveles contaminantes de detergentes, fenoles, cianuros, fosfatos o bromatos, entre otros.

5. Conclusiones

A modo de conclusión se puede decir que la existencia de aguas minerales y termales en la zona estudiada viene condicionada por varios factores: en un primer lugar la existencia de dos familias de fracturas, por un lado la N120° E de carácter distensivo, y por otro una familia nortada de carácter compresivo, a través de las cuales se produce la infiltración, almacenamiento y circulación de las aguas termales. Por otro lado la topografía relativamente baja, con cotas cercanas a los 100 m., producida por el encajamiento del río Miño a su paso por este sector, favorece la intersección del circuito termal con la superficie topográfica y la consiguiente surgencia de las aguas termales.

Los análisis químicos revelan facies predominantes bicarbonatadas sódicas fluoruradas con elevados contenidos de F, B y SiO₂, lo que confirman su origen termal, además de sus elevadas temperaturas con un máximo de 68° C. Junto a ello se ponen de manifiesto que no existen importantes alteraciones en la composición de este agua en lo que a contaminación de origen antrópico se refiere.

Por otro lado las numerosas obras realizadas para la captación de agua, sobre todo en forma de sondeos de incluso más de 100 m. de profundidad, no se han ejecutado de forma correcta para ofrecer una máxima protección de las aguas termales, constituyendo puntos de riesgo en los que existe mezcla de aguas frías y superficiales, y donde pueden llegar a producirse vertidos accidentales que pongan en peligro la calidad del recurso hidromineral de una zona más amplia que la del propio sondeo. Esto queda demostrado a través de las medidas de temperaturas más bajas de lo esperado, así como valores bajos de pH en algunos sondeos.

En último lugar cabe destacar algunas recomendaciones para la correcta explotación y conservación del acuífero termal y profundo de origen fisural que da lugar a tan abundante cantidad de recursos hidrotermales. Por un lado se pone de manifiesto la necesidad de realizar un control periódico de los manantiales y sondeos más importantes mediante análisis químicos de detalle que pudieran descubrir variaciones en la composición del agua a medio plazo.

Junto a ello se hace necesaria la ordenación y ejecución correcta de las obras de captación ya existentes, así como las futuras, sobre todo en el caso de sondeos. Esto se podría alcanzar por medio del asesoramiento, por parte de técnicos en la materia, a la hora del diseño y ejecución de las obras de captación, así como realizar un control, por parte de la administración, de los sondeos en explotación y de los caudales de aprovechamiento para obtener un balance de los recursos extraídos del acuífero. Además se hace patente y necesaria la realización de ensayos de bombeo y aforos en los pozos más productivos para determinar los caudales óptimos de explotación, así como parámetros hidráulicos del acuífero tales como permeabilidad, transmisividad o coeficiente de almacenamiento, entre

otros, lo que sin duda contribuiría en gran medida al conocimiento subterráneo del medio para una mejor y mayor protección del recurso.

Por último, recomendar la urgente necesidad de afrontar la eliminación de los vertidos directos sin tratamiento al río Miño, tanto de aguas residuales urbanas como de industrias, que pone en riesgo directo de contaminación las zonas más superficiales del circuito termal y la salud de los usuarios de las aguas minerales.

Sin duda es la colaboración de los particulares junto con el apoyo y ayuda de las administraciones locales y regionales competentes y el asesoramiento de organismos de investigación y universidades lo que sin duda incidiría en la mejora del conocimiento, gestión y aprovechamiento de los caudales y temperaturas del recurso hidromineral que en esta zona de Ourense surge de forma privilegiada.

Referencias

- Araujo Nespereira, P.; Seara Valero, J. (1993). Estudio geológico y prospección geofísica del manantial termal del Tinteiro (municipio de Orense). *Dpto. Recursos Naturales y Medio Ambiente*. Facultad de Ciencias de Orense. Universidad de Vigo. 146 pp.
- Baeza, J.; Corral-Lledó, M.M.; Del Barrio, V. (2004). Estudio hidrogeológico y de las condiciones de captación para la mejora del aprovechamiento de los recursos hidrominerales de la C. A. de Galicia. Vol VI Estado de las captaciones utilizadas en los diferentes aprovechamientos *IGME y Consellería de Innovación e Industria de la Xunta de Galicia*.
- De Vicente, G. et al.. 2004. Estructura Alpina del Antepaís Iberico en *Geología de España*. IGME. Madrid.
- Fernández-Portal, J.M.; Corral-Lledó, M.M.; Ferrero-Arias, A. (2006). Estudio científicotécnico de las aguas minerales de Galicia. *Actas II Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios, Oporto*.
- Ferrero-Arias, A. (2000). El ITGE y las aguas subterráneas en Galicia. *Las aguas subterráneas en el NO de la península Ibérica*, pp. 531-548.
- Ferrero Arias, A. (2004). Estudio hidrogeológico y de las condiciones de captación para la mejora del aprovechamiento de los recursos hidrominerales de la C. A. de Galicia. Vol III Geología regional de los recursos hidrominerales. *IGME y Consellería de Innovación, Industria y Comercio de la Xunta de Galicia*. 53 pp.
- Galdo, F. (1995). Introducción a la historia de las aguas minerales de Galicia. *Publicacións do Seminario de Estudos Galegos*. A Coruña. 385 pp.
- GEOMECÁNICA Y AGUAS, S.A. (1995). Las aguas minerales en Galicia. *Xunta de Galicia*.
- González-Casado, J.M.; Giner Robles, J. (2000) Relaciones entre fallas y sismicidad en el noroeste peninsular. *Geogaceta n° 28* pp.71-74.
- IGME (1980). Estudio de las manifestaciones termales de Galicia orientadas a su posible explotación como recursos geotérmicos. *Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid.
- IGME (1982). Investigación geotérmica de rocas calientes secas en la zona septentrional de la provincia de Orense, vol 1-4. *Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid.
- IGME (1984). Investigación geotérmica de dos zonas de la provincia de Orense. *Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid. 156 pp.
- IGME (1986). Informe sobre el seguimiento geotérmico del sondeo Orense-4. *Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid. 36 pp.
- López-Fernández, C., Pulgar, J.A., Gallart, González-Cortina, J.J.M., Díaz, J. y Ruiz, M. 2002. Actividad sísmica reciente en el noroeste de la Península Ibérica. *3ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica Valencia*.
- Rodríguez-Míguez, L. (2001). Ourense Termal. *Alva Gráfica, S.L.* 440 pp.
- Rueda, J y Mezcuca, J. (2001) Sismicidad, Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en Galicia *Publicación Técnica IGN n° 35*. Instituto Geográfico Nacional España

EMPLEO DE DISPERSIONES COLOIDALES DE BENTONITA PARA EL SELLADO DE POZOS DE CAPTACIÓN DE AGUA TERMAL

G. Astray^{a*}, P.A. Araujo^b, J.A. Cid^b, A.L. Gúezmes-Barriuso^c

^aDpto. Química Física de la Universidad de Vigo, Fac. Ciencias, 32004-Ourense, Galicia

^bDpto. Geociencias Marinas de la Universidad de Vigo, Fac. Ciencias, 32004-Ourense, Galicia.

^cXeoAquis S.L. Ourense, Galicia

Resumen

Durante diferentes actividades conducentes a la construcción de un balneario en las proximidades de las fuentes termales de “As Burgas”, se procedió a la realización de diferentes sondeos para evaluar los parámetros hidráulicos del acuífero y su productividad. Como resultado de los mismos se vio afectado el caudal de las fuentes termales de “As Burgas”, provocándose un descenso del caudal que no se tenía referencia histórica de un hecho similar, salvo durante el terremoto de Lisboa (1755), cuando dichas Fuentes dejaron de manar. Con el objetivo de subsanar el daño provocado sobre las mencionadas fuentes, y con el fin de aplacar la alarma social generada, se ideó un método de sellado en el cual se aprovechó la capacidad de absorción de agua y por otro lado la capacidad impermeable de una arcilla de carácter coloidal conocida con el nombre de Bentonita Sódica. Una vez finalizado el proceso de sellado, el caudal de las fuentes se recuperó satisfactoriamente, volviendo a niveles de caudal y temperatura similares a los medidos antes de las actuaciones urbanísticas.

Keywords: bentonita, arcillas, geotecnia, sellado, termalismo.

1. Introducción

El conjunto de surgencias termales conocidas como “As Burgas” representan uno de los símbolos de la ciudad, en torno al cual la imaginaria popular ha desarrollado curiosas y fascinantes historias y leyendas que se adentran en la Historia plasmándose en la devoción de Calpurnia Aebana a las ninfas de estas aguas. Desde estos tiempos pretéritos, el devenir de estos manantiales, localizados en la parte final de una vaguada natural que divide en dos el núcleo histórico de la ciudad de Ourense, ha venido marcado por el desarrollo social y cultural de la ciudad hasta el momento actual.

La utilización de las aguas ha ido determinando el desarrollo urbanístico del área que se compone, hoy en día de : Burga Alta, Burga del Medio, Burga Baja y Fervedoiro, conformando el conjunto una zona abierta en tres niveles que enmarcan las fuentes antes mencionadas y cuya última remodelación data de 1989. La Burga Alta, considerada como tal la más antigua, es una construcción en piedra de líneas sencillas del siglo XVII que canaliza las aguas aflorantes en un punto superior y que, a partir de un distribuidor, da servicio a dos caños. Se aprecian, en el momento actual, filtraciones de agua de la misma naturaleza al pie del muro que actúa como cierre del conjunto. La Burga del Medio, de reciente construcción, consta de un estanque con gran desarrollo horizontal y escasa profundidad que se alimenta de las aguas de la Burga Alta que canalizadas brotan formando una cortina en la pared Norte que la separa de la vía pública. La Burga Baja, la más emblemática de las tres, es una construcción de tipo neoclásico realizada en el siglo XIX con dos caños laterales y una copa central. Antiguamente, el agua que brotaba procedía de la Burga Alta y de otras pequeñas surgencias. Hoy en día, y según información del Servicio de Ingeniería del Ayuntamiento de Ourense, el caño de la izquierda viene canalizado de un naciente situado en una finca próxima, mientras que el caño de la derecha se nutriría de otras pequeñas surgencias así como la que brota en el propio punto. En esta Burga, en su lado más al Sur, se encuentra un pilón hoy denominado Fervedoiro, y antiguamente “de las Tripas”, de forma cuadrada y protegido por diferentes verjas con nacientes en su propio recinto a la vez que se canalizan hacia él los de otros puntos.

Uno de los pocos estudios, con un objetivo científico concreto y un grado de temporalidad, corresponde a D. Fermín Bescansa, catedrático del Instituto de Ourense, que entre 1.907 y 1.909 mide la temperatura en los diferentes caños de las fuentes estableciendo comparaciones con la temperatura ambiente y reflejando la constancia de estas. En dicho artículo, publicado en el Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, indica que hay una diferencia de caudal, no cuantificado, entre los caños de la Burga Baja siendo menor en el de la derecha. Precisamente en este año 1.909, de la publicación del trabajo de F. Bescansa, se propone al Ayuntamiento la explotación de las aguas de As Burgas con un servicio a domicilio mediante una conducción especial y manteniendo el uso público de las fuentes. En 1.922, La Región se hace eco de este proyecto señalándose en la información que en ese momento los caudales eran de “700 m³ en 24 horas”.

El desarrollo urbano, en la década de los ochenta, con la construcción y remodelación de edificaciones en las proximidades ha dado lugar a nuevos puntos de surgencia de aguas termales cuya utilización y cuantía exacta de explotación se desconocen en el momento actual, y durante diferentes actividades de obra civil conducentes a la construcción de un balneario en las proximidades de las fuentes termales de “As Burgas” (figura 1), se procedió a la realización de dos sondeos sobre material granítico (*Granodiorita de Ourense*) para evaluar los parámetros hidráulicos del acuífero fisural y su productividad. Como resultado de dichos sondeos se vio afectado el caudal normal de las Fuentes termales de “As Burgas”, debido a que los sondeos ejecutados fueron surgentes con un caudal conjunto en torno a los 6 l/s y procedentes del reservorio que alimenta a las mencionadas fuentes y otros puntos de surgencia cercanos que se encuentran a una cota superior. El descenso del caudal de las Fuentes, de interés turístico, afectadas fue tan drástico que no se tenía referencia histórica de un hecho similar, salvo durante el terremoto de Lisboa, ocurrido en el año 1755, cuya influencia provocó que dichas Fuentes dejaron de manar. Este hecho constituye una de las pruebas

First Author et al. / II Iberic Meeting of Colloids and Interfaces

mas claras de la relación existente entre los esfuerzos tectónicos y tensiones que provocan la actividad sísmica y los caudales de las surgencias termales. Recientemente, existen referencias orales entre el caudal de diferentes surgencias a lo largo del territorio gallego y la actividad sísmica asociada a la falla de Triacastela. A lo largo de su historia este conjunto de manantiales solo dejó de manar en dos ocasiones. En 1.755, como ya se ha dicho, con ocasión del terremoto de Lisboa, las fuentes no brotaron durante un periodo de 24 horas y en 1.855 como consecuencia de las obras ejecutadas para la construcción de una fuente con cuatro caños con objeto de dar un mejor servicio al vecindario, el nivel indicado para los caños en el proyecto era superior al de la fuente antigua por lo que se abandonó.



Figura 1.- Burgas Baja, caño izquierda y copa central de la fuente de las Burgas.

Con el objetivo de subsanar el daño provocado sobre las mencionadas Fuentes, y con el fin de aplacar la alarma social generada, se ideó un método de sellado en el cual se aprovechó la capacidad de absorción de agua y por otro lado la capacidad impermeable de una arcilla de carácter coloidal conocida con el nombre de Bentonita Sódica (1).

La bentonita es una arcilla utilizada en cerámica de grano muy fino y naturaleza coloidal, del tipo de la montmorilinita que contiene bases y hierro (2). El nombre deriva de un yacimiento que se encuentra en Fort Benton, Estados Unidos (figura 2). El tamaño de las partículas es seguramente inferior a un 0,03% al del grano medio de la caolinita. El tipo más normal es la cálcica. La sódica tiene la propiedad de expandirse cuando admite agua en su estructura molecular. El hierro que contiene siempre le da color, aunque existe también una bentonita blanca. Este tipo dará un mejor color en reducción que en la oxidación cuando se emplea en cuerpos de porcelana. Existen diversos tipos de bentonita que varían tanto en la plasticidad como en la dureza. Existen unas pocas, como la tierra de batán, que carecen totalmente de plasticidad. Es una arcilla muy pegajosa con un alto grado de encogimiento (los enlaces entre las capas unitarias permiten la entrada de una cantidad superior de agua que en la caolinita).

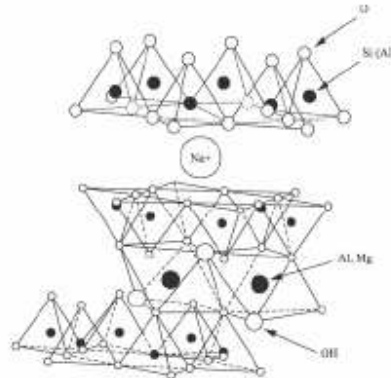
First Author et al. / II Iberic Meeting of Colloids and Interfaces

Figura 2.a.- Estructura de la bentonita sódica.



Figura 2.b.- Bentonita Sódica para uso en ingeniería civil.

Las mezclas de bentonita y agua son conocidos como lodos bentoníticos y/o lechadas bentoníticas y tienen una propiedad muy importante, que los hacen muy útiles en construcción (3-4). Cuando un lodo bentonítico es amasado sin que se produzca variación de agua, pierde resistencia, comportándose como un fluido. Sin embargo, vuelve a adquirir esta resistencia una vez que entra en reposo, lo que facilita su manejo. A su vez, la expansión que se produce al fraguar, mejora las propiedades de los materiales constructivos a la hora del proceso de sellado (5). La principal aplicación de los lodos bentoníticos está vinculada a las excavaciones de pilotes, muros pantalla y sellado de todo tipo de sondeos. Cuando se está excavando una zanja o ejecutando sondeos mecánicos, los lodos bentoníticos evitan que se produzcan desprendimientos en las paredes de la excavación o de los sondeos.

Durante la ejecución de la zanja o de los sondeos, el lodo va llenándolos: al estar en continuo movimiento, tiene poca consistencia, y se comporta como un fluido. Sin embargo, cuando se deja de remover, la viscosidad de los lodos bentoníticos aumenta, adquiriendo la resistencia necesaria como para evitar que las paredes de la excavación caigan, quedando constreñidas. Además, en terrenos poco competentes en los que se producirían desprendimientos, los lodos bentoníticos se introducen por los poros del terreno, formando el cake, que es una mezcla de la arena o grava del terreno, con la arcilla de la bentonita. Este cake le confiere al terreno de las paredes de la excavación una mayor cohesión y consistencia. Cuando los lodos bentoníticos se emplean en excavaciones, suelen servir para extraer los detritus del terreno. Esto se consigue recirculando constantemente los lodos (6). Por ello, se hace necesaria una limpieza de los mismos, eliminando los restos de detritus que contengan al extraerlos de la zanja.

De este modo, la bentonita constituye un coloide para ejecución y sellado muy adecuado y efectivo para diferentes usos constructivos y en especial para el sellado de pozos y todo tipo de prospecciones (7-10).

En el presente trabajo se muestra los resultados correspondientes al sellado de una prospección experimental realizada en las inmediaciones de las fuentes termales de "As Burgas" (Concello de Ourense) con el fin de subsanar los daños sufridos por el acuífero que alimenta dichas surgencias termales

2. Materiales y Métodos

La elaboración del lodo bentonítico se realizó mediante la dispersión de bentonita sódica en agua. Es de principal importancia el amasado de la mezcla, para que no se produzcan agregación de partículas, por lo que se utilizó una turbomezcladora.

Para la elaboración de la mezcla sellante, que se introdujo en los sondeos, se utilizaron los siguientes materiales y en las proporciones que se indican: Agua (65 %), Cemento sulforesistente (25 %), áridos silíceos de diámetro inferior a 3 mm (6-7%) y Bentonita sódica (3-4 %). Dicha mezcla se inyectó con bomba de lodos de abajo hacia arriba para que no se produjeran burbujas de aire que desestabilizaran la resistencia del sellante y únicamente con la presión de la columna hidrostática.

H ₂ O	65%
Cementos Sulforesistente	25%
Áridos silicios ($\phi < 3$ mm)	6-7%
Bentonita sódica	3-4%

3. Resultados y Discusión

Las características de las prospecciones a sellar son las siguientes: Dos sondeos de 60 y 65 m de profundidad y de diámetro de perforación igual a 320 mm, entubados en acero inoxidable de 200 mm de diámetro los 10-15 primeros metros y desnudos en el resto de su longitud. Las consecuencias de la ejecución de dichos sondeos se tradujeron en un drástico descenso del caudal de alguno de los caños de las fuentes termales, en concreto y sobre todo los caños de la Burga Alta, llegando incluso a dejar de manar uno de ellos. Por otro lado la altura del chorro de la copa de la fuente central de la Burga Baja decreció sustancialmente. Porcentualmente el descenso del caudal global de las fuentes se estimó en 24,8 %. Así mismo, se observaron modificaciones en la temperatura de surgencia que varió desde 64,9 °C a 63,1 °C. Por último, se produjo una variación en la concentración salina de las aguas minero-medicinales, que se tradujo en una variación en la conductividad eléctrica desde 1,068 mS/cm a 0,9365 mS/cm.

A la hora de introducir en los sondeos la mezcla sellante, descrita en el apartado anterior, se tubo que prolongar la tubería del sondeo hasta una altura en la cual el agua surgente igualara la presión atmosférica y se estabilizara el flujo dentro del sondeo para que a la hora de inyectar el material sellante, este no se lavara. Una vez construido el dispositivo de estabilización se procedió a introducir la tubería de inyección por dentro de la anterior y por la cual se introducirá la lechada bentonítica. Dicha tubería de inyección llegó hasta 1-2 m antes del final del sondeo y una vez instalada la misma se procedió a bombear la mezcla para comenzar a sellar el sondeo siempre de abajo hacia arriba. Según se iba inyectando el material sellante se iban retirando tramos de la tubería de inyección. Este procedimiento se repitió hasta la cota de boca de ambos sondeos. Se dejó fraguar la mezcla durante un tiempo considerable (mas de dos semanas) y

posteriormente se retiraron las chimeneas de estabilización, dejando por finalizadas las labores de sellado de ambos sondeos.

Parámetro*	Antes de la Crisis	Durante la Crisis	Tras el sellado
T / °C	64,9	63,1	64,8
κ / mS cm ⁻¹	1,0680	0,9365	1,0692

* valores promedio de las diferentes surgencias que componen el conjunto termal de As Burgas

La eficacia de la mezcla sellante ha sido comprobada posteriormente al sellado en diversas pruebas realizadas a tal fin. De este modo se ha realizado un seguimiento exhaustivo de los parámetros físico-químicos (T°, Conductividad y caudal) de las aguas de las fuentes termales afectadas, comprobándose que en un tiempo de 248 días después del sellado, los parámetros volvieron a valores normales, típicos de estas fuentes.

4. Conclusiones

A la vista de los valores de los parámetros físico-químicos, determinados durante el periodo de crisis y durante el proceso de seguimiento posterior al sellado, de las distintas surgencias pertenecientes al conjunto termal de As Burgas, y de sus inmediaciones, podemos concluir que la mezcla de empleada de composición 65% agua, 25% cemento sulforresistente, 6-7% áridos silíceos de diámetro inferior a 3 mm y 3-4% bentonita sódica, es adecuada para un sellado eficaz de sondeos para la extracción de aguas termales y minero-medicinales. Se ha observado una recuperación satisfactoria de las aguas minero-medicinales objeto del estudio. Así mismo hemos de señalar que a partir de la compartiva de la composición química de dichas aguas antes de la crisis y tras el periodo de estabilización del proceso de sellado no se ha observado contaminación de las mismas por parte de los materiales empleados en el mismo.

Agradecimientos: Los autores del presente trabajo agradecen al Ilmo. Concello de Ourense y a la Exma Diputación Provincial por el apoyo financiero para la realización de este estudio.

Referencias

1. C. Klein. Manual de Mineralogía de Dana; Reverté, Barcelona, 4nd edn. 1997.
2. C.E. Hofstadt, R. Fahn, R. Bentonite - a valuable and versatile mineral and raw material. Ind. Miner., Proc. 2nd Ind. Miner. Int. Congr. 1977:95-103.
3. K. Higaki. Utilities of bentonite as civil engineer. J. Soc. Inorg. Mat. 2002;9:365-372.
4. D. Lees, M. Chuaqui. Soil grouting: means, methods and design. Geotech. Special Pub. 2003;120:1347-1359.
5. G.M. Filz, R.D. Boyer, R.R. Davidson. Bentonite-water slurry rheology and cutoff wall trench stability. Geotech. Special Pub. 1997;71:139-153.
6. A. Vassmer. Use of flushing additives [in borehole drilling]. DVGW-Schriftenreihe, 1997;89:129-150.

