

## COMUNICACIÓN TEMA 2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y LIMITACIONES DEL ACUÍFERO CRETÁCICO INFERIOR EN LA REGIÓN DE LISBOA PARA SU POTENCIAL USO COMO RECURSO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA

**Rayco MARRERO DIAZ\* \*\*, Augusto COSTA\*\*\*, Luisa DUARTE\*, Elsa  
RAMALHO\*, Carlos ROSA\* y Diogo ROSA\*\*\*\***

(\*) Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Estrada da Portela. Bairro do Zambujal. Apartado 7586. Alfragide 2610-999. Amadora. Portugal. rayco.diaz@lneg.pt

(\*\*) Colaborador científico del Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN).  
38400 Puerto de la Cruz. Tenerife

(\*\*\*) Geodiscover - Consultores em Hidrogeologia Lda. Alcochete. Portugal

(\*\*\*\*) Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS). Copenhagen. Dinamarca

### RESUMEN

Los sondeos de prospección de gas y petróleo y los pozos de aguas subterráneas confirmaron la existencia de aguas subterráneas profundas en el Cretácico Inferior de la región de Lisboa (Portugal) susceptibles de ser utilizadas como recursos geotérmicos de baja entalpía. Su temperatura (50°C a 1500 m de profundidad), moderada salinidad (~0.9 g/L), e interesantes características hidrodinámicas (hasta 400 m<sup>2</sup>/d de transmisividad y 4 L/s/m de caudal específico), han hecho históricamente de estas masas de agua contenidas en las formaciones del Cretácico Inferior un objetivo prioritario en los proyectos geotérmicos para usos directos. No obstante, los dos proyectos geotérmicos ejecutados en la década de 1990 fueron sólo explotados durante un relativamente corto periodo de tiempo, debido a problemas relacionados con las características técnicas del pozo y del equipo de bombeo, y/o a problemas de salinización progresiva del fluido extraído. La presente comunicación aborda las principales características hidrogeológicas y limitaciones de este acuífero con el objetivo de evaluar si su potencial geotérmico es susceptible de suplir a largo plazo las diferentes necesidades, en términos de caudal y temperatura, para usos directos, sin poner en peligro la sostenibilidad del recurso.

**Palabras clave:** *recursos geotérmico, Cretácico Inferior, salinización, Lisboa*

## INTRODUCCIÓN

Las grandes cuencas sedimentarias suelen ser favorables para la existencia de importantes acuíferos profundos que, admitiendo un gradiente geotérmico medio (33°C/km), también son susceptibles de ser explotados como reservorios geotérmicos (e.g. Lopez et al., 2010). En la región de Lisboa (Portugal), aunque el gradiente geotérmico es relativamente más bajo 22°C/km), diversos sondeos de prospección de hidrocarburos y pozos de aguas subterráneas, junto con los mapas regionales de densidad de flujo de calor (Correia et al., 2002), confirmaron la existencia de aguas subterráneas profundas susceptibles de ser utilizadas como recursos geotérmicos de baja entalpía (Figura 1).

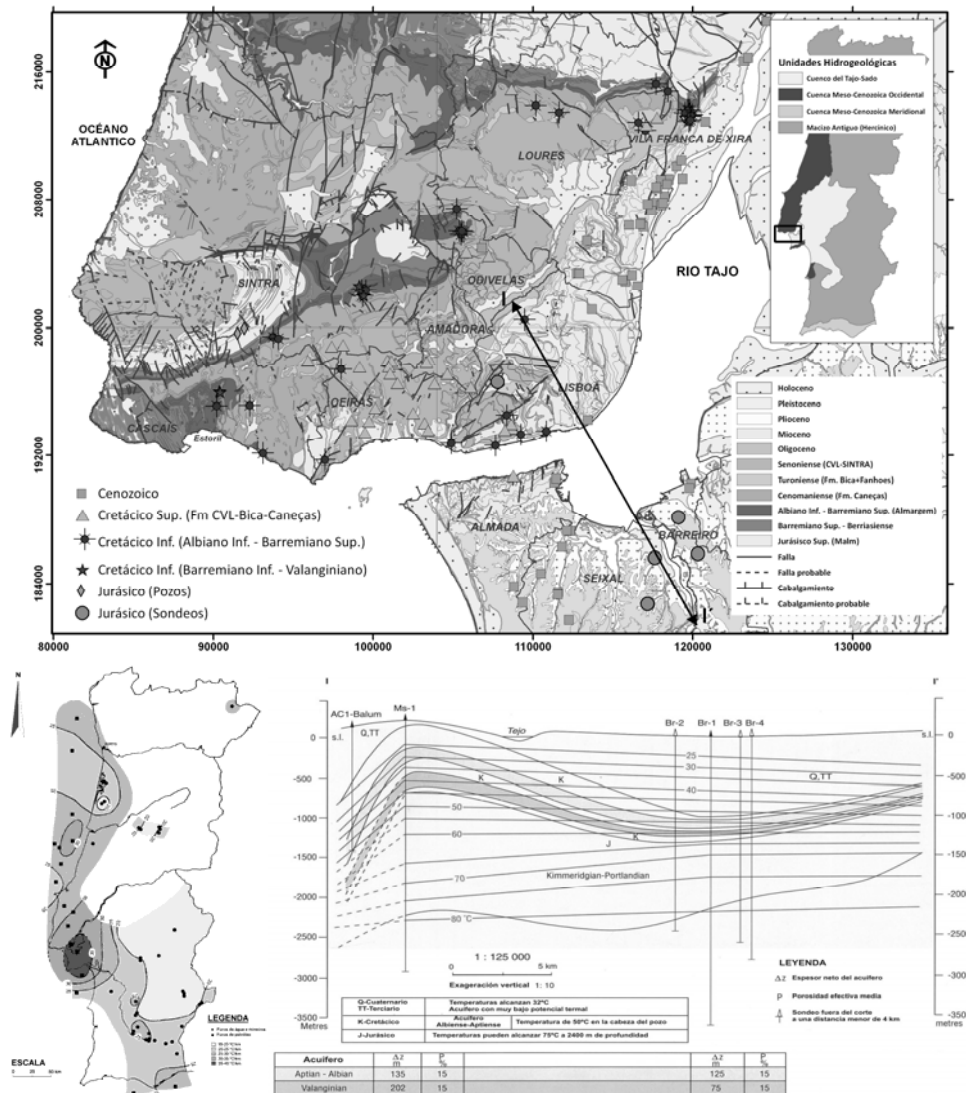


Figura 1. Superior: Mapa geológico simplificado del área de estudio (modificado de los mapas 34-A, B, C y D, escala 1:50k), con los pozos de aguas subterráneas (en función del nivel acuífero captado) y los sondeos de exploración de hidrocarburos. En la parte superior derecha se ha indicado el mapa de las principales unidades hidrogeológicas de Portugal, con el área de estudio ampliada. Inferior izquierda: Mapa del gradiente geotérmico medio de Portugal Continental (IGM, 1998). Inferior derecha: Corte geológico, modificado de Correia et al. (2002), identificando las formaciones del Cretácico Inferior con mayor potencial geotérmico (Aptiano-Albiano y Valanginiano), así como las isotermas estimadas por los sondeos de prospección petrolífera y el pozo geotérmico AC1-Balum.

Los potenciales reservorios geotérmicos más importantes en la región de Lisboa son: (1) los sedimentos detríticos del Mioceno, con buenas transmisividades (50-150 m<sup>2</sup>/d), pero que cuyas aguas no superan los 32°C; (2) las formaciones detríticas y/o carbonatadas del Albiano – Aptiano y Valanginiano (Cretácico Inferior), con transmisividades menores que el Mioceno (~50 m<sup>2</sup>/d), pero con aguas a 50°C a 1500 m de profundidad; (3) los calcáreos Jurásicos, con aguas a 75°C aproximadamente, pero a profundidades de 2500 m (Carvalho et al., 1990; Correia et al., 2002). Por tanto, en relación a los parámetros de profundidad-temperatura-transmisividad, el Cretácico Inferior presenta *a priori* las mejores características de los tres potenciales reservorios geotérmicos identificados en la región de Lisboa.

La presente comunicación, que en su mayoría es producto de la reinterpretación de estudios previos llevada a cabo en el marco del proyecto postdoctoral del primer autor, aborda las principales características hidrogeológicas y limitaciones de las formaciones del Cretácico Inferior en la región de Lisboa, para su potencial uso como recurso geotérmico de baja entalpía. El objetivo final del proyecto es evaluar si dichas formaciones son susceptibles de suplir a largo plazo las necesidades, en términos de caudal y temperatura, para usos directos (e.g. calefacción de infraestructuras), sin poner en peligro la sostenibilidad del recurso.

## Área de estudio

El área de estudio corresponde administrativamente con los distritos de Lisboa y Setúbal, a ambos márgenes del río Tajo, en el cuadrante sur-occidental de Portugal. Desde el punto de vista climático, según la clasificación de Thornthwaite (1948) se trata de un clima sub-húmedo seco o húmedo, mesotérmico, con déficit de agua en verano (Ramalho et al., 2001). El periodo de mayor precipitación es entre octubre y mayo, aumentando espacialmente desde la costa occidental hacia las zonas de interior con valores medios anuales entre 500 mm y 800 mm/año, que pueden alcanzar los 1000 mm/año en las cumbres de Sintra.

El área de estudio se encuadra en los mapas geológicos 34-A, B, C y D de escala 1:50k (LNEG, 2011; Ramalho et al., 1993, 2001; Pais et al., 2006). Desde el punto de vista tecto-sedimentario, las formaciones del Cretácico Inferior en la región de Lisboa forman parte de la Cuenca Meso-Cenozoica Occidental, constituida por una serie sedimentaria de más de 3 km de potencia, depositada en una fosa tectónica originada por el basculamiento del Macizo Hercínico (Rasmussen et al., 1998). En ella están presentes rocas sedimentarias de edades comprendidas entre el Triásico y la actualidad siguiendo una secuencia normal, aunque con una importante laguna estratigráfica en el Cretácico Superior, de cuya edad son dos importantes formaciones ígneas de la región: el Macizo Sub-Volcánico de Sintra (MSVS) y el Complejo Volcánico de Lisboa (CVL) (Ramalho et al., 2001). En el área de estudio, las formaciones del Cretácico Inferior forman una estructura sinclinal poco inclinada, cuyo eje está orientado NE-SW, parcialmente modificado por varias fallas y pliegues, como la falla de Vila Franca de Xira o el anticlinal de Monsanto (Pais et al., 2006) (Figura 1).

## **CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS Y LIMITACIONES**

En las formaciones sedimentarias del Cretácico Inferior de la región de Lisboa no han sido reconocidos sistemas acuíferos individualizados debido, en parte, a la baja productividad y almacenamiento que, en general, poseen dichas formaciones desde el punto de vista hidrogeológico (Almeida et al. 2000). No obstante, existen algunas masas de aguas que localmente pueden permitir caudales de explotación elevados, del orden de las decenas de litros por segundo (Almeida et al. 2000). En relación a los parámetros de profundidad-temperatura-transmisividad, las formaciones del Cretácico Inferior más interesantes son las denominadas “Camadas de Almargem”, constituidas de muro a techo por las formaciones Regatão, Cresmina y Rodízio, de edad Aptiano-Albiano. Tanto las formaciones Regatão como Rodízio, son predominantemente detríticas (arenosas y argilosas), mientras que Cresmina es de naturaleza esencialmente carbonatada-margosa (Ramalho et al., 2001). Esta alternancia de litologías con diferentes permeabilidades y porosidades favorece la formación de un acuífero multicapa, que a su vez es semi-confinado por los depósitos volcánicos de baja permeabilidad del CVL y/o por las margas y arcillas paleogénicas (Complejo de Benfca) suprayacentes, confiriéndole características de artesianismo (frecuentemente positivo).

Las profundidades a las que se encuentran normalmente las “Camadas de Almargem” en la región de Lisboa, las cuales sólo afloran en diversas zonas del margen derecho del Tajo y en el borde meridional de la península de Setúbal, quedando en la zona intermedia cubiertos por los sedimentos de la Cuenca Terciaria Tajo-Sado (Figura 1), justifica algún desconocimiento en relación a las características de este potencial reservorio geotérmico. Debido a que la mayoría de los escasos pozos identificados en las “Camadas de Almargem” también bombean aguas de diferentes formaciones cretácicas, las características hidrodinámicas e hidroquímicas obtenidas de los informes de construcción de los pozos, corresponden a un conjunto de diferentes formaciones y, por tanto, han de ser tenidas en cuenta sólo como valores generales. Los resultados obtenidos indican un espesor medio aparente de 150 m (60-225 m), porosidades efectivas entre 15 y 25% y transmisividades medias ponderadas de 38 m<sup>2</sup>/d (2-406 m<sup>2</sup>/d), con caudales específicos medios de 0.4 L/s/m (0.02 y 4 L/s/m). Desde el punto de vista hidroquímico, las aguas subterráneas hipotermas (20-51°C) del Cretácico Inferior presentan una cierta homogeneidad, siendo en su mayoría HCO<sub>3</sub>-Cl-Na-Ca con valores medios de TDS inferiores a 1 g/L (Figura 2). Muchas aguas poseen concentraciones de Fe total relativamente altas, con media de 1.4 mg/L (0.02-8.9 mg/L), probablemente relacionadas con areniscas ferruginosas y condiciones reductoras en profundidad.

Estas características hidrodinámicas e hidroquímicas permiten que una eventual explotación de esta agua subterráneas pueda suministrar tanto energía geotérmica de baja entalpía como agua potable (una vez precipitado el hierro), disminuyendo la relación coste/beneficio de la instalación. De hecho, en la década de 1990, las “Camadas de Almargem” ya fueron explotadas con fines geotérmicos en la región de Lisboa en dos casos concretos, el pozo geotérmico AC1-Balum, del Hospital de la Fuerza Aérea Portuguesa en Lumiar, y el pozo geotérmico AC1-Oeiras, en los Servicios Sociales de las Fuerzas Armadas Portuguesas (Carvalho et al., 1990; Carvalho y Cardoso, 1994). La instalación geotérmica del pozo AC1-Balum, de 1495 m de profundidad, en funcionamiento entre los años 1992 y 2001, extraía un agua a 50°C que era utilizada para climatización ambiente y agua caliente sanitaria del hospital, así como para agua potable. El pozo AC1-Oeiras, de 495 m de profundidad, también extrajo durante un periodo indeterminado (pocos años) un agua de 30°C que fue utilizada para idénticos fines, aunque con apoyo de una bomba de calor geotérmica y un

circuito secundario. Actualmente los dos pozos geotérmicos se encuentran desactivados debido a problemas relacionados con las características técnicas del pozo y del equipo de bombeo, y/o a problemas de salinización progresiva del fluido extraído. El aumento de la salinidad en las aguas subterráneas del pozo geotérmico AC1-Balum entre los análisis de los años 1987 y 2001 (ver Figura 2), principalmente relacionado con una mayor concentración de Na, Cl y SO<sub>4</sub>, sugieren un proceso de mezcla con aguas salobres, ya sean intrusiones marinas (antiguas o modernas) o fluidos que disolvieron formaciones evaporíticas, contenidos en las formaciones supra o infrayacentes (Almeida et al., 1991). El estudio preliminar de los análisis físico-químicos de este fluido apuntan procesos de disolución de evaporitas (yesos, sal gema, etc.) con intercambio iónico Na/Ca y precipitación de CaCO<sub>3</sub> por efecto del ión común.

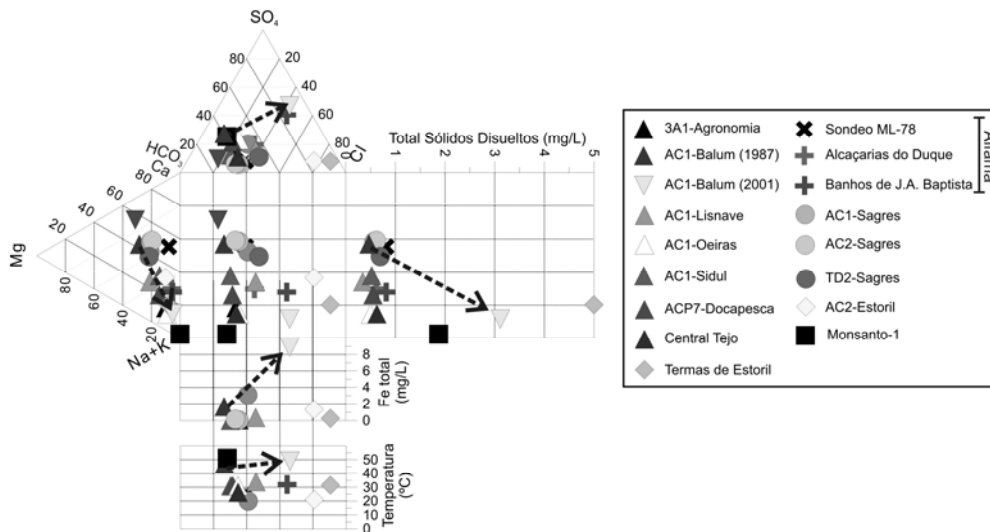


Figura 2. Diagrama de Durov modificado con las principales características físico-químicas de las aguas subterráneas en las formaciones del Cretácico Inferior en la región de Lisboa. Las flechas indican las variaciones composicionales y el aumento de salinidad observado entre los años 1987 y 2001 en el fluido del pozo geotérmico AC1-Balum.

Otra posible limitación del Cretácico Inferior en la región de Lisboa para su explotación como reservorio geotérmico es su complejidad estructural, relacionada principalmente con la existencia de fallas, pliegues e intrusiones de diques y sills del CVL y del MSVS (Carvalho et al., 1990). La información obtenida de los ensayos a caudal constante de larga duración efectuados en el pozo geotérmico AC1-Balum indica que, tras 80 días de bombeo a 6 L/s, no se alcanza un régimen permanente, sugiriendo unas reservas hídricas subterráneas relativamente limitadas (A.Cavaco, 1989). En el pozo geotérmico AC1-Oeiras, los aumentos bruscos de pendiente de la curva de descensos obtenida en los ensayos a caudal constante de larga duración, sugieren la existencia de barreras de recarga, aunque la falta de piezómetros de observación dificulta la correcta interpretación de los resultados. Todos estos elementos pueden eventualmente jugar un papel importante en el control del flujo subterráneo, minimizando la recarga tanto vertical como horizontal. Esta hipótesis también se sustenta en el tiempo de residencia del orden de 12 ka para el fluido del pozo geotérmico AC1-Balum, que fue obtenido a través del análisis del <sup>14</sup>C en el año 1987 (A.Cavaco-CFG, 1989), sugiriendo una recarga de agua moderna muy limitada, al igual que se ha observado en otros acuíferos cretácicos de la Cuenca Meso-Cenozoica Occidental (Almeida et al., 2000).

## CONCLUSIONES

La información obtenida hasta ahora de los estudios previos, sugiere una baja tasa de recarga y una fuerte compartimentación del Cretácico Inferior en la región de Lisboa. Este hecho, unido a que se trata de una región con una fuerte presión urbanística que impermeabiliza constantemente las reducidas zonas de recarga, puede representar una limitación para la exploración geotérmica, dado que la cantidad de fluido (agua subterránea) disponible puede ser relativamente reducida en algunas zonas. Los procesos de salinización progresiva de los pozos geotérmicos AC1-Balum y AC1-Oeiras, después de un relativamente corto periodo de explotación, indican procesos de mezcla de las aguas subterráneas nativas con intrusiones marinas (antiguas o modernas) y/o con fluidos profundos que disolvieron formaciones evaporíticas, que sólo con futuros análisis geoquímicos del fluido ( $\delta^{34}\text{S}$ , rCl/rBr, etc.) será posible diferenciar su origen. Todos estos factores deben ser considerados para evaluar correctamente la disponibilidad en términos cuantitativos y cualitativos del recurso geotérmico. En este sentido, además de proponer la eventual reinyección del fluido geotérmico en detrimento de su potencial uso como agua potable, los autores de este estudio resaltan la importancia de desarrollar planes de explotación y sistemas de monitorización adecuados para garantizar la sostenibilidad de este potencial reservorio geotérmico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.CAVACO (1989). *Estudo de viabilidade de aproveitamento geotérmico de águas subterrâneas do Cretácico no Hospital do Lumiar em Lisboa – Relatório Final*. Obra nº 2206 (Internal Report), 185 pp.
- A.CAVACO – CFG (1989). *Etude Geochimique du Fluide Geothermal de Balum-Lumiar (Portugal)*. Complemento al informe N°89, CFG 62, pp. 2.
- ALMEIDA, C.; MENDONÇA, J.J.L.; JESUS, M.R. e GOMES, A.J. (2000). *Actualização do Inventário dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água, vol. 1 e 2.
- CARVALHO, J.M. & CARDOSO, A.A.T. (1994). *The Air Force Hospital Geothermal Project in Lisbon*. Geothermics'94 en Europe Document n°230, Ed. BRGM, Orléans, Francia, pp. 441-448.
- CARVALHO, J.M.; BERTHOU, P.Y. e SILVA, L.F. (1990). *Introdução aos Recursos Geotérmicos da Região de Lisboa*. Libro tributo a Carlos Romariz – Secção de Geologia Económica e Aplicada, Lisboa, pp. 332-356.
- CORREIA, A.; RAMALHO, E.; RODRIGUES DA SILVA, A.M.; MENDES-VICTOR, L.M.; DUQUE, M.R.; AIRES-BARROS, L.; SANTOS, F.M. y AUMENTO, F. (2002). *Portugal*. En: Atlas of Geothermal Resources in Europe (Eds: Suzanne Hurter and Ralph Haenel), 92 pp. + 89 plates; pp. 47-49.
- IGM (1998). *Recursos Geotérmicos em Portugal Continental-Baixa Entalpia*. Folheto de divulgação sobre geotermia, DRHG, 24 pp.
- LNEG (Diversos autores) (2011). *Notícia explicativa da Folha 34-B Loures*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa, 57 pp.
- LOPEZ, S.; HAMM, V.; LE BRUN, M.; SCHAPER, L.; BOISSIER, F.; COTICHE, C. & GIUGLARIS, E. (2010). *40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France*. Geothermics, 39 (4), 339-356. doi:10.1016/j.geothermics.2010.09.005.
- PAIS, J.; MONIZ, C.; CABRAL, J.; CARDOSO, J.L.; LEGOINHA, P.; MACHADO, S.; MORAIS, M.A.; LOURENÇO, C.; RIBEIRO, M.L.; HENRIQUES, P. e FALÉ, P. (2006). *Notícia explicativa da Folha 34-D Lisboa*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Lisboa, 74 pp.

RAMALHO, M.M.; REY, J.; ZBYSZEWSKI, G.; MATOS ALVES, C.A.; PALÁCIOS, T.; MOITINHO DE ALMEIDA, F.; COSTA, C. e KULLBERG, M.C. (2001). *Notícia explicativa da Folha 34-C Cascais*. Instituto Geológico y Minero, Lisboa, 104 pp.

RAMALHO, M.M.; PAIS, J.; REY, J.; BERTHOU, P.Y.; MATOS ALVES, C.A.; PALÁCIOS, T.; LEAL, N. y KULLBERG, M.C. (1993). *Notícia explicativa da Folha 34-A Sintra*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 77 pp.

RASMUSSEN, E.S.; LOMHOLT, S.; ANDERSEN, C. & VEJBAEK, O.V. (1998). *Aspects of the structural evolution of the Lusitanian Basin in Portugal and the shelf and slope area offshore Portugal*. *Tectonophysics*, 300, 199-225.

THORNTWAITE, C.W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. *Geologic. Rev.*, 38, 55-94.