

# Alteración hidrogeotérmica en el acuífero carbonatado de Marbella por influencia del vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina (Marbella, Málaga)

*Hydrogeothermic alteration in the carbonated aquifer of Marbella under the influence of the urban solid waste landfill of La Mina (Marbella, Málaga)*

I. Vadillo Pérez, F. Carrasco Cantos y B. Andreo Navarro

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga, 29071. Málaga.

## ABSTRACT

Measurements of temperature loggings in piezometers and water temperature in the surrounding of the urban solid waste landfill of La Mina (Marbella, Málaga) have shown an alteration in the natural thermal field of the carbonated aquifer of Marbella. The difference between the landfill temperature (70 °C), because of the wastes degradation, and the groundwater (18-19 °C) have generated an increase of more than 65 % of the natural hydrogeothermal gradient towards the landfill, and more than 2 °C in the average groundwater temperature. The correlation coefficient between the hydrogeothermal gradient ( $R = -0.993$ ) or groundwater temperature ( $R = -0.870$ ) with the distance to the landfill show high and negative values. The homogeneous lithology in the area, made up exclusively by marbles of Triassic age, discards changes in the temperature due to different thermal conductivities of the rock.

**Key words:** Vertedero de La Mina, Marbella, acuífero carbonatado, registros de temperatura, gradiente hidrogeotérmico, alteraciones del campo hidrogeotérmico.

Geogaceta, 36 (2004), 123-126  
ISSN:0213683X

## Introducción

Los vertederos de residuos sólidos urbanos no sólo pueden afectar a un acuífero mediante la infiltración de lixiviados hacia el medio subterráneo (Baedecker y Back, 1979; Nicholson *et al.*, 1983; Christensen *et al.*, 2001; Tatsi y Zouboulis, 2002; Vadillo, 2003), también el calor generado por las reacciones exotérmicas en el interior de los residuos produce alteraciones del campo térmico en los alrededores (MacFarlane *et al.*, 1983; Christensen *et al.*, 1992; Malard y Chapuis, 1995). El aumento de la temperatura disminuye la densidad y viscosidad del lixiviado, con lo que se incrementa la conductividad hidráulica y, con ella, la facilidad del lixiviado a migrar en el acuífero (MacFarlane *et al.*, 1983; Christensen *et al.*, 1992).

En el presente trabajo se analiza la afección del vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina en el campo térmico del acuífero carbonatado de Marbella (Figura 1). Para ello se han estudiado las variaciones de la temperatura con la profundidad y se han obtenido los valores de

temperatura media del agua en los puntos de control situados en los alrededores del

vertedero entre Septiembre de 1996 y Marzo de 1998.

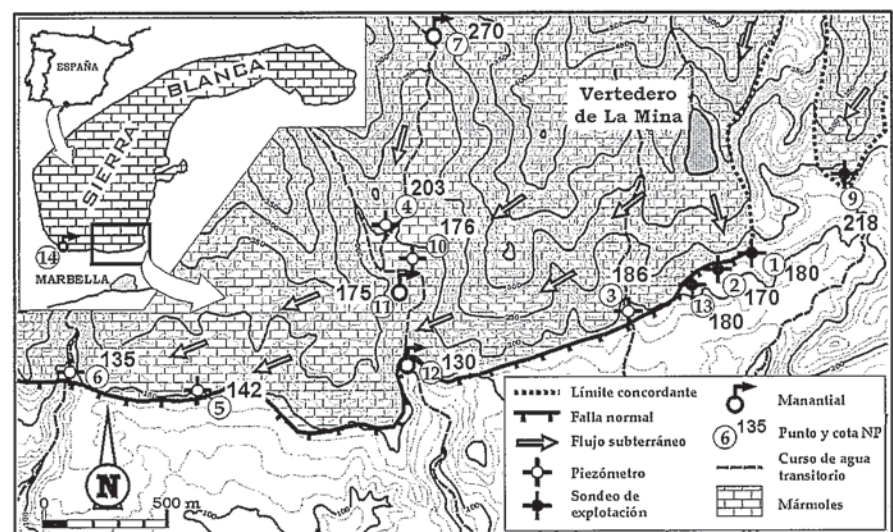


Fig. 1.- Mapa del área de estudio con la localización de los puntos de agua muestreados a lo largo de la investigación y el vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina. Los datos de cota piezométrica están expresados en metros sobre el nivel del mar.

Fig. 1.- Map of the study area with the location of the sampling points during the research period and the urban solid waste landfill of La Mina. Elevation of water table is expressed in meters above sea level.

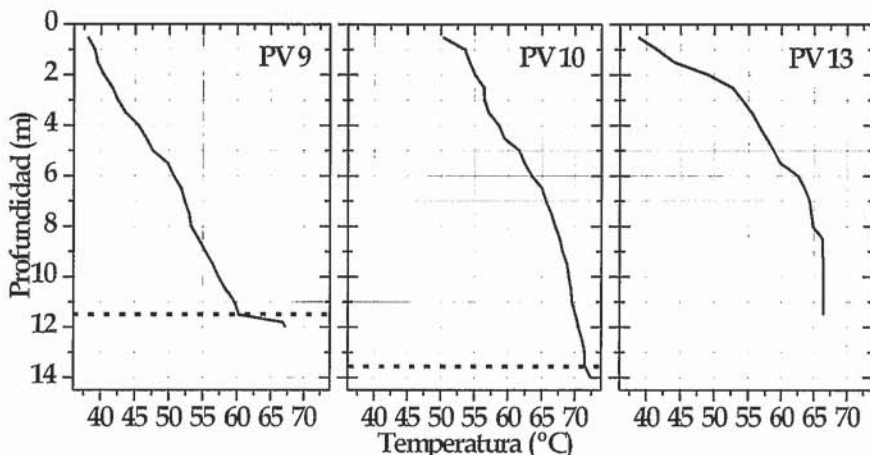


Fig. 2.- Registros de temperatura en tres piezómetros de control construidos en el interior del vertedero. Las líneas discontinuas en cada gráfico indican la situación del nivel piezométrico de lixiviado.

Fig. 2.- Temperature loggings in three piezometers inside the landfill. Dashed lines in each graph indicate the position of the leachate piezometric level.

**Marco geológico e hidrogeológico**

El vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina se encuentra ubicado a 60 Km al Oeste de la ciudad de Málaga y está emplazado a unos 2 Km al Norte de la localidad de Marbella, en las estribaciones meridionales de Sierra Blanca (Figura 1). Los vertidos, en su mayoría de origen urbano, comenzaron en el año 1975 y finalizaron durante el mes de Diciembre de 1999, momento en el que la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía procedió a las labores de clausura. Al final de su periodo activo el volumen de basura almacenado alcanzó unos 650.000 m<sup>3</sup>, valor calculado a partir de la planimetría de fotos aéreas (54.000 m<sup>2</sup>) y el espesor medio de residuo atravesado en las perforaciones realizadas para la clausura (12 metros). Dicho vertedero ha sido objeto de investigación debido a la afección que provoca la infiltración de su lixiviado en las aguas subterráneas del acuífero carbonatado de Marbella (Vadillo *et al.*, 2002; Vadillo, 2003), ya que no está dotado de sistemas de impermeabilización en su base, por lo que la basura está en contacto directo con la roca subyacente.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el vertedero se emplaza sobre los mármoles dolomíticos y calizos que constituyen el sistema acuífero de Marbella (Andreo *et al.*, 1997). Este acuífero comprende la parte meridional de Sierra Blanca y está delimitado al Sur y Oeste por fallas normales, que ponen en contacto los mármoles con los materiales impermeables (esquistos y gneises) del bloque hundido (Figura 1). Presenta un funcionamiento de tipo kárstico, ya que los manantiales responden rápidamente ante las precipitaciones con aumentos del caudal de varios órdenes de

magnitud y disminuciones de la mineralización y temperatura del agua asociadas también a los periodos de recarga (Andreo y Carrasco, 1999). Las medidas de nivel piezométrico realizadas en la zona de estudio permiten deducir que el flujo subterráneo se produce de NE a SO.

**Características hidrotérmicas del vertedero y del acuífero carbonatado**

Los procesos bioquímicos que se producen en el seno de la basura generan reacciones exotérmicas que incrementan la

temperatura, como se pone de manifiesto en los registros de temperatura realizados en los piezómetros de control del vertedero (PV 9, PV 10 y PV 13 en la Figura 2). Los datos de temperatura corresponden a valores del aire, excepto en los puntos PV 9 y PV 10 donde a partir de 11'5 m y 13'5 m, respectivamente, se alcanza el nivel piezométrico de lixiviado. Los datos por debajo de esas profundidades se corresponden a la temperatura del lixiviado almacenado en el interior del vertedero. Los registros muestran temperaturas siempre superiores a 40 °C, con aumentos a lo largo de la vertical hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 70 °C en la base de los piezómetros.

El manantial de Nagüeles, principal punto de drenaje del sistema de Marbella (Punto 14 en figura 1), presenta una temperatura media del agua de 19'0 °C, 1 grado por encima de la temperatura media diaria del aire en la zona de estudio (17'8 °C). Por lo tanto existe una diferencia de más de 50 °C entre la temperatura del lixiviado y la del agua subterránea en este sistema acuífero.

**Afecciones del vertedero en el campo hidrogeotérmico del acuífero carbonatado**

*Registros de temperatura en los piezómetros de control*

Todos los piezómetros donde se realizaron los registros de temperatura del

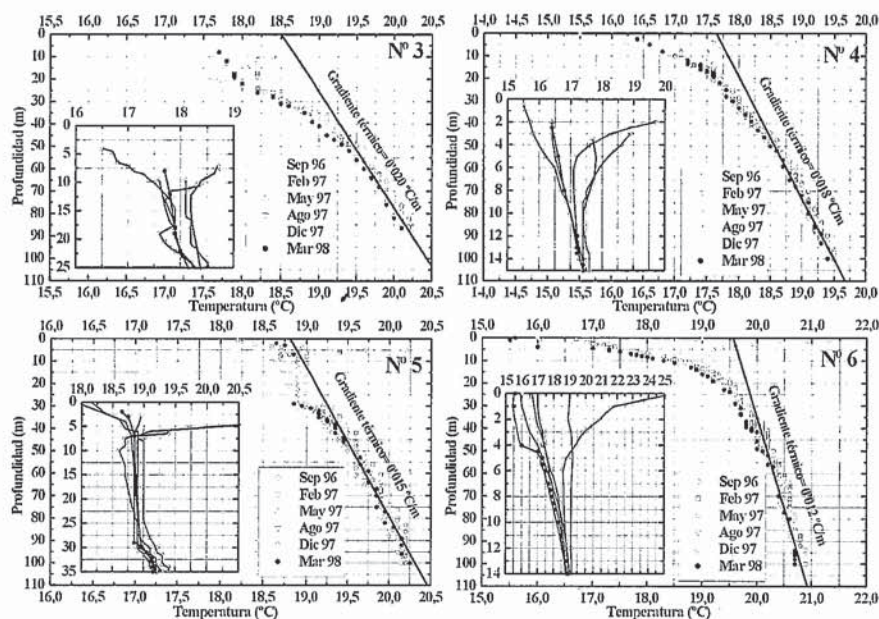


Fig. 3.- Registros de temperatura realizados en los piezómetros 3, 4, 5 y 6. Se han marcado las rectas y los valores del gradiente hidrogeotérmico en cada punto. En los diagramas internos se muestran las variaciones de temperatura en la zona heterotérmica a lo largo del periodo de estudio.

Fig. 3.- Temperature loggings in piezometers 3, 4, 5 and 6. Lines of the hydrogeothermic gradient and theirs values have been marked for each point. In inner diagrams there are shown the variations of temperature in the heterothermic zone during the study period.

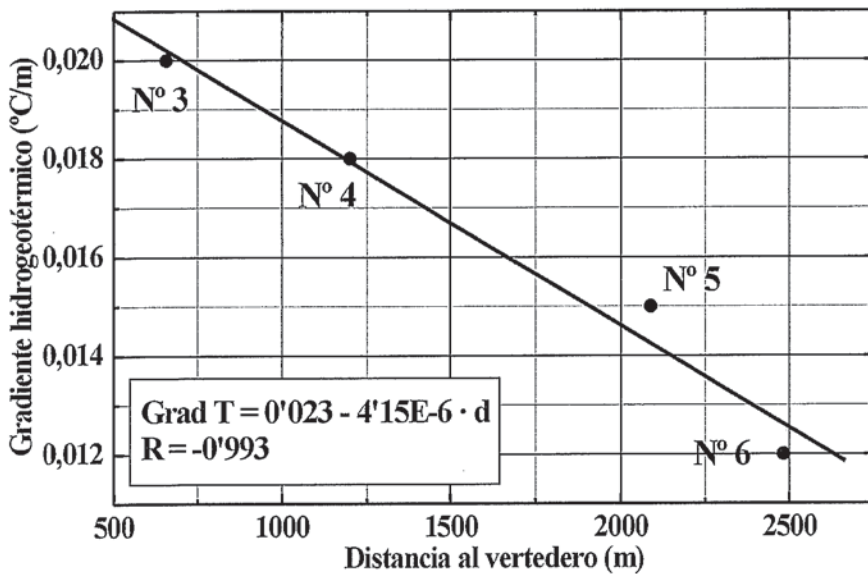


Fig. 4.- Relación entre el gradiente hidrogeotérmico en los piezómetros de control en el acuífero y la distancia al vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina.

Fig. 4.- Relation between the hydrogeothermic gradient in the piezometers of the aquifer and distance towards the urban solid waste landfill of La Mina.

agua (piezómetros 3, 4, 5, 6, y 10) presentan una gran homogeneidad litológica, ya que exceptuando intercalaciones metapelíticas de poco espesor, la columna litológica está formada por los mármoles del sistema de Marbella. Este hecho permite descartar que las variaciones de temperatura observadas en los registros sean debidas a cambios en la conductividad térmica de la roca, edad y/o compactación de los mármoles, parámetros que se citan en la literatura como factores modificadores del flujo conductivo del calor en la roca (Pfister y Rybach, 1995; Ge, 1998; Stulc, 1998).

Se han representado seis campañas de medida de la temperatura, repartidas a lo largo del periodo comprendido entre Septiembre de 1996 y Abril de 1998 (Figura 3). No se han representado los registros del piezómetro 10 porque el valor del gradiente hidrogeotérmico es similar al del punto 4.

En los 15 metros más superficiales, se reconoce la zona heterotérmica con variaciones estacionales de temperatura, de acuerdo a la evolución de la temperatura del aire en la zona. Por debajo de esa profundidad los registros adoptan formas convexas hasta los 40-50 m, pero a partir de estas profundidades, las variaciones lineales de temperatura con la profundidad indican que se ha alcanzado la zona homotérmica. En esta zona, los registros indican que se ha alcanzado un sistema estacionario, es decir, no existen variaciones provocadas por influencia exterior, por lo que es posible calcular el gradiente

geotérmico en cada uno de los puntos.

En la figura 3 se observan diferencias superiores al 65% entre el máximo, del piezómetro N° 3 (0'020 °C/m) y el mínimo, del piezómetro N° 6 (0'012 °C/m). La representación de los gradientes hidrogeotérmicos con respecto a la distancia de los piezómetros al vertedero (Figura 4) permite constatar una alta relación negativa ( $R = -0'993$ ) con respecto a la distancia al vertedero.

#### Alteraciones de la temperatura media en los puntos de control

Se han representado los valores de la temperatura media del agua (Tabla 1) de los sondeos (1, 2, 9 y 13), manantiales (7, 11 y 12) y la registrada en los piezómetros

PUNTO	n	Temp media	PUNTO	n	Temp media
1	16	20,9	7	17	18,6
2	24	21,1	9	12	21,9
3	12	19,9	10	6	19,5
4	13	20,0	11	18	17,4
5	13	20,4	12	7	18,3
6	12	20,1	13	5	20,5

Tabla I.- Valores de la temperatura media del agua subterránea (en grados centígrados) en los 12 puntos representados en la figura 5. Leyenda, n = número de muestras.

Table I.- Mean values of groundwater temperature (in grades centigrades) in the 12 points plotted in figure 5. Legend, n = number of samples.

de control en el acuífero (3, 4, 5, 6 y 10) con respecto a la distancia al vertedero (Figura 5). En el caso de los piezómetros, se han tomado las temperaturas correspondientes a los 100 metros de profundidad, a partir de la línea de gradiente térmico (Figura 3). En el caso del punto 3, se ha extrapolado el dato correspondiente a los 100 m, para que los valores de temperatura en los piezómetros puedan ser comparados entre sí.

La figura 5 ha permitido diferenciar dos grupos de agua, (1) aguas de los piezómetros 5 y 6, y (2) el resto de muestras, que presentan una tendencia de ascenso de la temperatura con la cercanía al vertedero. Esta relación entre distancia y temperatura del agua presenta un coeficiente de correlación negativo de  $-0'870$ . Los puntos 5 y 6, situados ambos a más de 2 Km del vertedero y con temperaturas entre 20 y 21 °C, no se ajustan a la tendencia calculada para el resto de muestras.

#### Discusión y conclusiones

En un medio subterráneo, el transporte de calor se realiza por conducción, a través de la roca y del agua contenida en los poros y/o huecos, y por convección, mediante el movimiento del agua en el acuífero que transporta el calor. La actuación conjunta de ambos procesos genera un campo hidrogeotérmico que varía con el valor de la conductividad térmica de la roca y el movimiento del agua desde las zonas de recarga hasta las de descarga (Domenico y Schwartz, 1998). En una situación de homogeneidad litológica, las variaciones del gradiente hidrogeotérmico serían debidas exclusivamente al transporte convectivo del calor y el gradiente

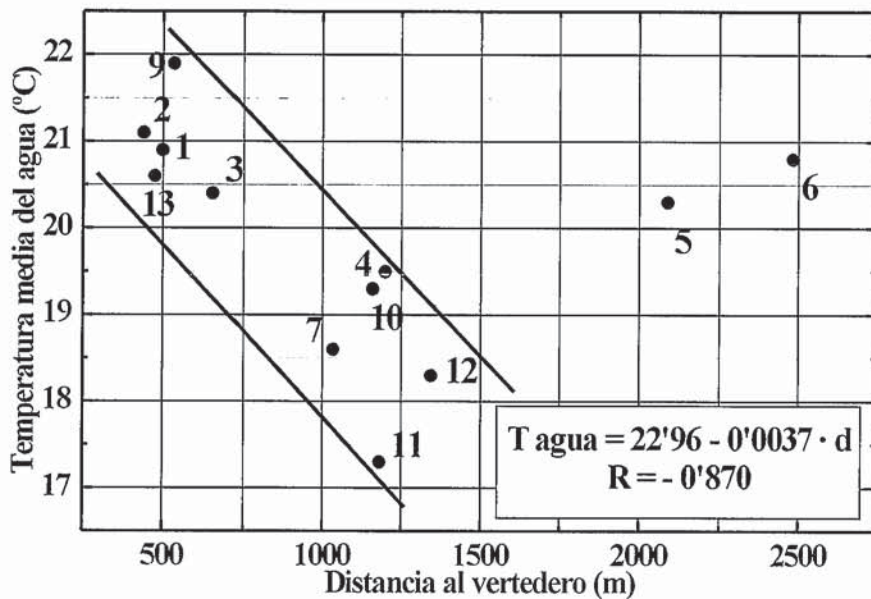


Fig. 5.- Relación entre la temperatura media del agua en los puntos de control con respecto a la distancia al vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina. La ecuación y el coeficiente de correlación corresponden a los 10 puntos dentro del sector indicado.

Fig. 5.- Relation between the mean groundwater temperature for each water point and distance towards the urban solid waste landfill of La Mina. The equation and correlation coefficient correspond to the 10 points inside the lines.

disminuiría en las zonas de recarga y aumentaría en las zonas de descarga. Los registros de temperatura efectuados en los piezómetros de control del área de estudio permiten afirmar que se produce un aumento del gradiente hidrogeotérmico hacia el vertedero, es decir, de forma contraria a lo que cabría esperar en las condiciones naturales mencionadas con anterioridad, ya que el vertedero está situado a mayor cota que los piezómetros de control y, por lo tanto, en la zona de recarga del sector de estudio (Figura 1).

La misma tendencia ascendente se observa en la temperatura media de las muestras de agua recogidas en los sondeos, manantiales y piezómetros, con un alto coeficiente de correlación entre la temperatura y la distancia al vertedero. Sin embargo, las muestras de los puntos 5 y 6 no cumplen esta relación. La explicación puede deberse a la situación de ambos puntos en el borde occidental del acuífero, que es hacia donde se dirigen las

líneas de flujo subterráneo (Figura 1), por lo que están situados en la zona de descarga natural. Esto provoca que las líneas de flujo subterráneo lleguen a tener una importante componente vertical, lo que implicaría un ascenso de aguas más profundas y, por tanto, de mayor temperatura. Un hecho que permite corroborar esta explicación, es que en esa zona el nivel piezométrico se encuentra muy próximo a la superficie, e incluso en el punto 5, durante las épocas de recarga llega a ser surgente, fenómeno que no se observa en el resto de piezómetros de la zona.

Se concluye que el vertedero de La Mina, mediante las reacciones exotérmicas de descomposición de la basura, ha generado un flujo de calor continuo hacia la roca circundante que ha aumentado el gradiente térmico en los mármoles más cercanos y la temperatura del agua subterránea. La existencia de dichas alteraciones de la temperatura, hasta una distancia considerable del vertedero indi-

ca que los mármoles tienen suficiente capacidad de retención de calor como para que persista en el tiempo la zona de alta temperatura.

**Agradecimientos**

Este trabajo es una contribución al Grupo de investigación RNM-308 (Grupo de Hidrogeología) de la Junta de Andalucía, a los proyectos IGCP-448 de la UNESCO y a los proyectos REN2002-01797/HID y REN2003-01580de la DGI.

**Referencias**

Andreo, B.; Carrasco F. y Sanz de Galdeano C. (1997): *Environ. Geol.*, 30 (3/4), 163-173.  
 Andreo, B. y Carrasco, F. (1999): *Appl. Geochem.*, 14 (2), 61-77.  
 Baedecker, M.J. y Back, W. (1979): *Ground Water*, 17 (5), 429-437.  
 Christensen, T.H.; Cossu, R. y Stegmann, R. (1992) *Landfilling of Waste: Leachate*. Elsevier Applied Science. 493 p.  
 Christensen, T.H.; Kjeldsen, P.; Bjerg, P.; Jensen, D.L.; Christensen, J.B.; Baun, A.; Albrechtsen, H. y Heron, G. (2001): *Appl. Geochem.*, 16, 659-718.  
 Domenico, P.A. y Schwartz, F.W. (1998): *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, 506 p.  
 Ge, S. (1998): *Jour. Volcanol. Geoth. Res.*, 84, 93-101.  
 MacFarlane, D.S.; Cherry, J.A.; Gillham, R.W. y Sudicky, E.A. (1983): *Jour. Hydrol.*, 63, 1-29.  
 Malard, F. y Chapuis, R. (1995): *Jour. Hydrol.*, 173, 191-217.  
 Nicholson, R.V.; Cherry, J.A. y Reardon, E.J. (1983): *Jour. Hydrol.*, 63, 131-176.  
 Pfister, M. y Rybach, L. (1995): *Geothermics*, 24, 95-100.  
 Stulc, P. (1998): *Tectonophysics*, 284, 161-174.  
 Tatsi, A. y Zouboulis, A.I. (2002): *Adv. Environ. Res.*, 6, 207-219.  
 Vadillo, I; Andreo, B y Carrasco, F. (2002): *Geogaceta*, 31, 91-94  
 Vadillo, I. 2003. *Tesis Doctoral*, Universidad de Málaga, pp. 224.