

# **EVOLUCIÓN DEL NIVEL FREÁTICO EN LA MITAD ORIENTAL DEL ACUIFERO DE LAS CAÑADAS DEL TEIDE. CUANTIFICACION DE PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS**

**FARRUJIA DE LA ROSA, Isabel; VELASCO CEBRIAN, José Luis; FERNANDEZ BETHENCOURT, José (1); MARTIN LUIS, M<sup>a</sup> Candelaria (2)**

(1) Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) (2) Dpto. de Edafología y Geología. Univ. de La Laguna

**PALABRAS CLAVES:** nivel freático, pluviometría, recarga

## **RESUMEN**

Las medidas de nivel freático realizadas en la mitad oriental de Las Cañadas del Teide, en los sondeos de investigación de que dispone el Consejo Insular de Aguas de Tenerife, evidencian una evolución continuada descendente en su posición, lo que implica una progresiva disminución de las reservas. La recarga efectiva, asociada a períodos de lluvia muy intensa (superiores a la pluviometría media anual), sólo es capaz de provocar máximos relativos en las áreas más alejadas de las zonas de descarga del acuífero.

La temperatura del agua, variable en profundidad, aumenta a lo largo del periodo de observación; con intervalos de contención por efecto de la recarga. La conductividad eléctrica, igualmente variable en profundidad y con una tendencia evolutiva ligeramente creciente, en el nivel más somero del acuífero invierte su tendencia por efecto de recargas cuantiosas.

La correlación entre los escasos períodos de pluviometría intensa y la evolución del nivel, ha permitido estimar la velocidad media de circulación de las aguas de infiltración a través de la zona no saturada.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Para conocer la posición del nivel freático en la porción central de la Isla, el Cabildo Insular de Tenerife ejecutó, a comienzos de la década de los noventa, dos sondeos profundos de gran diámetro en Las Cañadas del Teide (Farrujia et al, 2001a). El sondeo S-1, emboquillado a 2.264 m de altura y con 505 m de profundidad, se localiza en la porción central, al sur del Edificio Teide-Pico Viejo; el sondeo S-2, de 404 m de profundidad y emboquillado a 2.134 m de altura, se sitúa al noreste de la depresión, a 7,1 km del S-1 (Figura nº1).

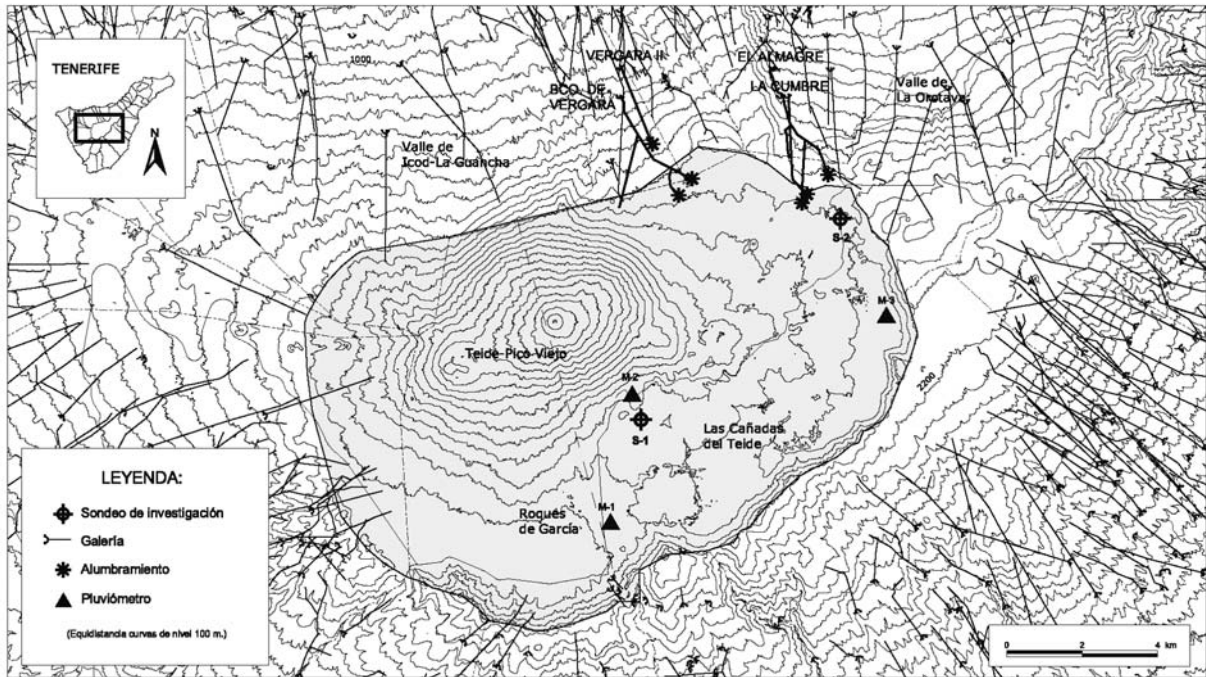


Figura nº 1. Plano de situación.

En el sondeo S-1, tras varios años de toma manual de datos, se acometió en 1995 el diseño, la instalación y el equipamiento de una Estación de Adquisición de Datos (EAD). En la EAD se miden y registran en modo continuo, entre otros, los siguientes parámetros: posición del nivel freático y la temperatura, pH y conductividad eléctrica del agua a tres profundidades distintas. Las características técnicas de los equipos (resumidas en el Cuadro nº 1) y los resultados obtenidos tras el primer año de observación pueden consultarse con amplitud en Farrujia, et al, 2001b.

Por su ubicación y características, la EAD ha despertado en estos años el interés de diversos equipos investigadores, los cuales han hecho uso de las instalaciones y/o datos obtenidos para diferentes proyectos de investigación.

Parámetro	Tipo de sonda	Marca	Precisión	Observaciones
Nivel	Sonda de presión relativa (presión de inmersión)	DRUCK PTX-1830	± 1 cm	Instalada, inicialmente, a 10 m bajo el nivel del agua
C.E.	Inductiva	Readaptación de una FOXBORO 871 EC	± 40 uS/cm	El sondeo corta el nivel freático a unos 448 m de profundidad, y penetra unos 57 m en la zona saturada. Las sondas están instaladas a tres profundidades N-1: 454 m N-2: 474 m N-3: 494 m
T	Termistor NTC de precisión		± 0,2 °C	
pH	Diferencial de cartucho salino intercambiable	LIESLE METRIX P-65C-6-0	0,03 ud. de pH	

Cuadro nº 1: Parámetros básicos medidos y características de las sondas.

Este trabajo muestra los datos obtenidos en ambos sondeos, desde enero de 2000 hasta abril de 2004, especialmente los registrados en la EAD, analizándolos tanto de forma individualizada como en relación con la pluviometría y las extracciones.

## 2. MARCO GEOHIDROLÓGICO

La porción central de Tenerife está ocupada por Las Cañadas del Teide, una depresión aproximadamente elíptica de unos 100 km<sup>2</sup> de superficie, con una altitud media superior a los 2.000 m y en cuyo interior se alza el estratovolcán Teide-Pico Viejo, un complejo volcánico con una altitud máxima de 3.717 m. (Figura nº1).

La Caldera está confinada en su mitad meridional por una escarpada pared, de hasta 500 m de altura, y abierta hacia el norte a través de un valle de deslizamiento denominado Valle de Icod - La Guancha (Navarro y Coello, 1989), el cual se ha ido rellenando por la acumulación de emisiones posteriores. En el interior de La Caldera aflora un espolón de materiales fonolíticos, Los Roques de García, que dividen la depresión en dos mitades: la oriental y la occidental.

Los materiales que conforman Las Cañadas se agrupan en dos grandes unidades o conjuntos, de edad y significado geohidrológico diverso:

- Materiales Pre-Cañadas. Anteriores o coetáneos con la formación de la depresión, cuya edad es superior a los 180.000 años.
- Materiales Post-Cañadas. Emitidos con posterioridad a la formación de la depresión, rellenan tanto la depresión como el valle de salida hacia el norte (Valle Icod-La Guancha).

En la mitad oriental de la depresión, con una superficie de unos 68 km<sup>2</sup>, la porción activa del acuífero se desarrolla en coladas basálticas olivínico-piroxénicas de la secuencia de relleno, con permeabilidad por porosidad y por fracturación. El nivel freático, al sur del Teide-Pico Viejo, se localiza a 1.819 m de altura (sondeo S-1); variando la potencia de la zona saturada en función de la morfología del zócalo impermeable (potencia estimada, de unos 300 m en el extremo noreste - Farrujia, et al, 2001a). Las aguas, de tipo bicarbonatado sódico, están afectadas por la actividad volcánica residual (emanación de gases, tanto puntual como difusa). El gradiente hidráulico en el interior de la depresión es del 0,7 %, incrementándose de forma notable hacia el valle de salida (13 %).

Dadas las características geohidrológicas de los materiales que conforman la pared meridional y los gradientes hidráulicos, el flujo subterráneo en la mitad oriental de la depresión se canaliza preferentemente hacia el N-NE (Valle de Icod - La Guancha).

### 3. DATOS REGISTRADOS EN LA EAD.

Aunque todas las variables se registran con una periodicidad de treinta minutos, en este trabajo se han utilizado los valores de la media aritmética de las lecturas de cada parámetro a nivel diario. Analizados los datos, se han eliminado aquellos que arrojaban valores claramente anómalos, atribuidos a interferencias eléctricas; para ello se ha comparado cada valor con la media de los diez valores anteriores y posteriores.

En el período considerado, enero del 2000 a abril 2004, diversas incidencias han dado lugar a interrupciones en el sistema de adquisición de datos de algunos parámetros, y en menor medida del conjunto de la estación. Por su tipología, las más notables son: cortes en el suministro energético (especialmente en invierno) y averías en las sondas (pH y C.E.-T). Debemos señalar, que en el primer semestre del año 2002 hubo que desconectar todas las sondas de los niveles N-2 y N-3.

**Nivel.** En enero de 2000 el nivel freático se localizaba a 1.819 m de altura. A lo largo de los años 2000 y 2001 se produjo un descenso lineal continuado, con una ligera aceleración de los descensos en el segundo año respecto del primero. Durante 2002, se mantiene la tendencia descendente, aunque se observan tres tramos con diferente pendiente. Entre febrero y julio del 2003, el nivel sube considerablemente (1,08 m), diferenciándose en este periodo cuatro intervalos: los tres primeros de ascenso y el cuarto de estabilización. Desde agosto de 2003 a abril de 2004 se recupera una tendencia decreciente similar a la de 2001 (Figura nº 2).

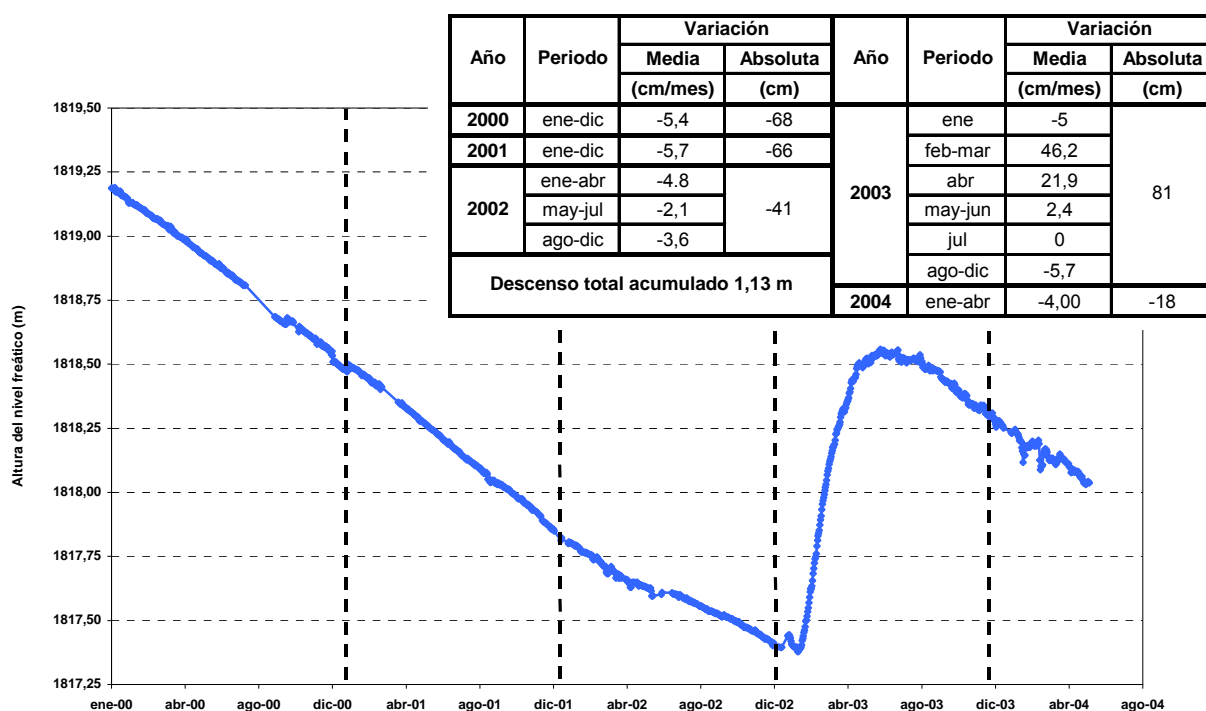


Figura nº 2. Evolución del nivel freático registrada en la EAD

**Temperatura (T).** Durante los años 2000 y 2001, la T del agua en los tres niveles presenta una tendencia similar; con un aumento lineal de 0,6°C. En 2002, la T del N-1 se estabiliza, mientras que en los niveles N-2 y N-3 mantiene una tendencia creciente similar a la de los años anteriores. En 2003 la T de los tres niveles permanece estable. En 2004 la T del N-1 recupera la tendencia creciente y la de los niveles N-2 y N-3 continúa estable (Figura nº 3).

En 2000 y 2001 la T del N-1 es del orden de 0,4°C más baja que la de los niveles N-2 y N-3. Durante los dos años siguientes, la diferencia alcanza los 0,7°C. La temperatura de los niveles N-2 y N-3 tiene, durante todo el periodo de observación, valores similares (desviación máxima entre ambas del orden de 0,2°C).

T (°C)	2000/2001		2002		2003		2004
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial
N-1	17,8	18,4	18,4				18,5
N-2	18,5	19,2	-	19,4	19,4		19,4
N-3	18,5	19,0	-	19,3	-	19,2	19,3

**Conductividad eléctrica corregida a 25°C (C.E.).** La C.E. del N-1, en el periodo de enero de 2000 a abril de 2002 muestra una tendencia ligeramente creciente; cambiando de sentido durante el segundo semestre del año 2002. En 2003 se marca la tendencia descendente, volviéndose a estabilizar a comienzos de 2004.

Las frecuentes interrupciones en la secuencia de datos válidos (desconexión, avería de sondas, y deriva en C.E. del N-2) no permiten analizar con detalle la evolución de la C.E. en los niveles N-2 y N-3, por lo que no serán objeto de discusión (Figura nº4).

C.E. (µS/cm)	2000/2001		2002		2003		2004
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial
N-1	1.850	1.900	1.910	1875	1.875	1.800	1.800
N-2	1.880	1.950	-	1.950	-	-	1.800
N-3	1.880	1.950	-	1.975		1.775	1.850

**pH.** Durante todo el periodo de observación el pH de los tres niveles se ha mantenido estable en valores entre 6,60 y 6,70.

#### 4. OTROS DATOS CONSIDERADOS.

**Evolución del nivel en el sondeo S-2.** En febrero de 2000, el nivel freático se localizaba a 1.769 m de altura. Este sondeo carece de equipos de registro en continuo, midiéndose el nivel con una sonda eléctrica manual. Se han efectuado 21 medidas (febrero 2000 a enero de 2004), que muestran un descenso lineal continuado con un valor absoluto de 10,5 m (0,22 m/mes de media).

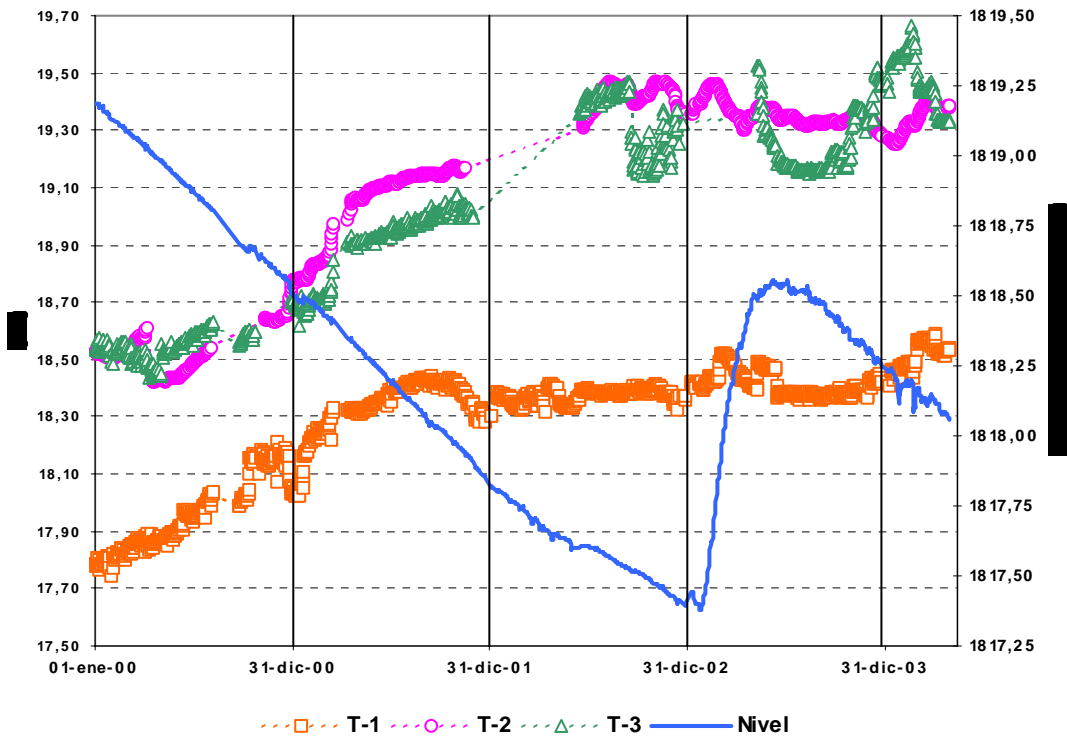


Figura nº 3 – Evolución de la temperatura del agua registrada en la EAD, a tres profundidades en la porción de zona saturada cortada por el sondeo S-1.

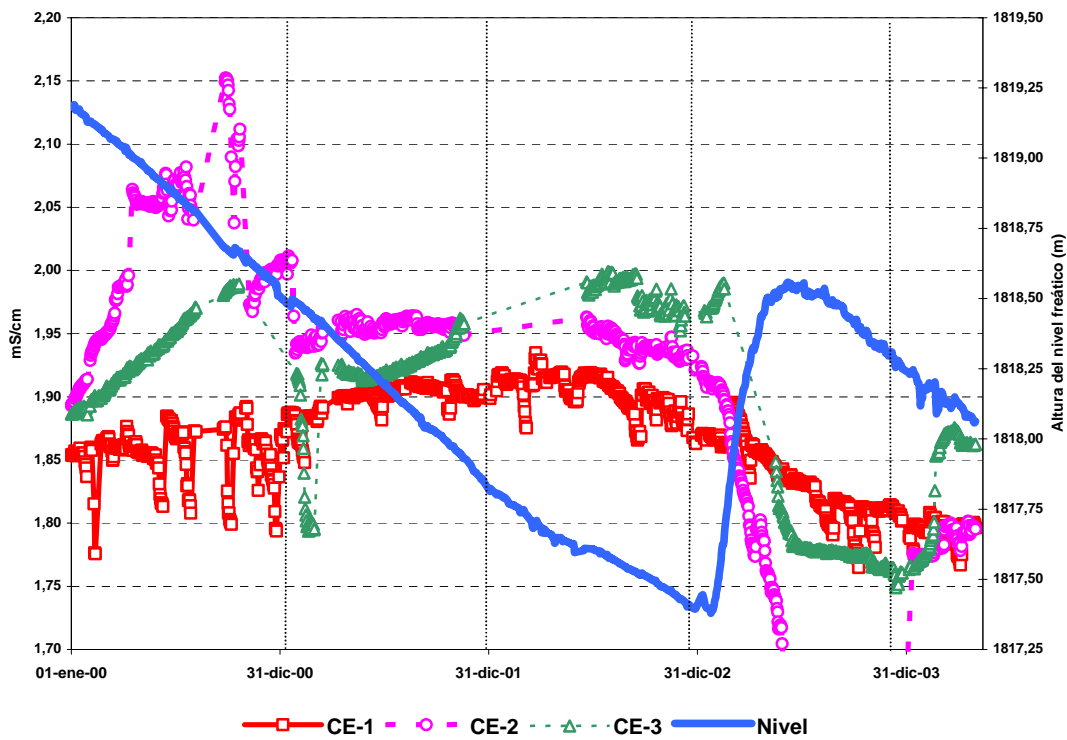


Figura nº 4 – Evolución de la conductividad eléctrica del agua, corregida a 25°C (C.E.), registrada en la EAD, a tres profundidades en la porción de zona saturada cortada por el sondeo S-1.

**Pluviometría.** Dado que no se dispone de estimaciones directas de la recarga, se usa la precipitación como parámetro para la correlación.

En Las Cañadas del Teide la lluvia varía tanto en su magnitud con el tiempo como en su distribución territorial, consecuencia fundamentalmente de un fenómeno de inversión de su magnitud con la altura y por el efecto de pantalla del edificio Teide-Pico Viejo, frente a ciertos frentes tormentosos. En la mitad oriental de la depresión la pluviometría media anual, estimada en base a datos de los últimos 17 años, es de 368 mm.

Aplicando un modelo de simulación de Hidrología de Superficie (Braojos, J.J. 1997) se ha estimado el balance hídrico de superficie en la mitad oriental de la depresión, para el período 1986-1993 (Cuadro nº 2).

Año Hidrológico	P	ETR	E	R	VRES
	mm	% s/P	% s/P	% s/P	% s/P
1986/1987	164	70	0	30	0
1987/1988	550	26	0	74	0
1988/1989	267	37	0	63	0
1989/1990	679	26	0	72	1
1990/1991	359	34	0	68	-2
1991/1992	398	19	0	81	0
1992/1993	358	30	0	70	0
Media	397	30	0	70	0

**Cuadro nº 2.** Balance hídrico de superficie. P- Precipitación, ETR – Evapotranspiración real, E – Escorrentía, R – Recarga, VRES – Variación de la Reserva.

La precipitación mensual en el área de estudio, para el período 1993-2003, se ha deducido a partir de los valores registrados en tres pluviómetros de la zona (Figura nº 1). Para ello se han relacionado los valores de la pluviometría recogida en cada una de las estaciones consideradas, para el intervalo 1986-1993, con los deducidos por el modelo para ese mismo período y área (mitad oriental de Las Cañadas del Teide). Los años previos a la puesta en marcha de la EAD fueron secos, con pluviometrías anuales en general inferiores a la media.

Año Hidrológico	PLUVIOMETROS			Precipitación media en la zona de estudio
	Parador (M-1)	Base Teide Gasolinera (M-2)	Diego Hdez. (M-3)	
	mm	mm	mm	mm
1993/1994	269	235	398	315
1994/1995	59	145	163	136
1995/1996	659	469	560	544
1996/1997	200	236	312	263
1997/1998	270	258	229	240
1998/1999	371	325	391	364
1999/2000	156	215	224	207

Fuente Instituto Nacional de Meteorología.

El Cuadro nº 3 muestra la precipitación (P) mensual de cada pluviómetro para el período considerado en este trabajo. El año hidrológico 2001/02 fue muy lluvioso, y en el 2002/03, aunque a nivel anual fue tan lluvioso como el anterior, las lluvias se produjeron en un único mes; más concretamente en tres días (12, 16 y 17 de diciembre). No se dispone de datos (s.d.) del mes de diciembre de 2003 para las estaciones M-2 y M3 (desbordadas).

Año		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total (mm)	P media (mm)
2000/01	M-1	0	0	30	0	0	0	7	0	0	0	0	11	48	96
	M-2	1	2	35	0	0	100	5	0	0	0	0	15	158	
	M-3	5	3	23	0	0	19	14	0	0	0	0	4	54	
2001/02	M-1	3	55	292	142	0	38	44	0	0	0	54	0	628	676
	M-2	4	166	227	168	0	65	72	0	0	0	116	0	818	
	M-3	3	73	63	222	18	84	68	1	0	0	57	0	589	
2002/03	M-1	36.5	0	569	4	0	0	0	0	0	0	0	0	610	592
	M-2	90	0	s.d.	5	0	0	0	0	0	0	78	0	583 (*)	
	M-3	20	21	s.d.	18	3	0	0	0	0	0	5	0	590 (*)	
2003/04	M-1	82	0	24	(*) Total estimado por los autores, tras obtener la pluviometría de dic-2002 para las estaciones M-2 y M-3 por correlación con la registrada en M-1.										
	M-2	145	9	3											
	M-3	72	1	1											

(Fuente Instituto Nacional de Meteorología)

**Extracciones.** Tres galerías alumbran agua en la mitad oriental de Las Cañadas del Teide: Bco. de Vergara, El Almagre y La Cumbre (Figura nº 1).

Extracción conjunta (Hm <sup>3</sup> /año)	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
	7,4	10,2	12,9	13,1	12,3	12,4	12,4	12,8	12,2	12,1

La galería Bco. de Vergara, emboquillada a 1.490 m de altura, alumbrada en el frente de la galería principal y en el frente del segundo ramal. Entre julio y agosto de 1996 se produjo un incremento en el alumbramiento del ramal, no pudiéndose conducir la totalidad del agua alumbrada hacia el exterior por falta de capacidad en las canalizaciones interiores. Gran parte del agua alumbrada discurrió hasta junio de 2000 por el piso del ramal, infiltrándose antes de llegar a su inicio.

Como consecuencia de esas infiltraciones, en septiembre de 1996 aumentó el caudal aprovechado en la galería Vergara II, emboquillada bajo la vertical de Bco. de Vergara, a 1.320 m de altura. El incremento, de unos 84 L/s, se produjo sin que previamente se realizaran labores en el interior de la galería. La distancia en planta entre el frente de Vergara II y el frente del ramal de Bco. de Vergara es de 1.530 m.



Para cuantificar el caudal alumbrado en Bco. de Vergara, se ha considerado tanto el aprovechado en la bocamina de esta galería, como el incremento que se produjo en el aprovechamiento de Vergara II a causa de las infiltraciones.

La galería El Almagre, emboquillada a 1.455 m de altura, alumbrada en el frente de su galería principal, situado en el ámbito del Valle de La Orotava, y en su segundo ramal localizado en el interior de Las Cañadas del Teide. Del caudal total aprovechado en bocamina, sólo se ha considerado la parte procedente de Las Cañadas.

## **5. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.**

Tras el análisis conjunto de los datos presentados, se considera que la recarga generada tras períodos de intensas lluvias es la responsable de las variaciones observadas en el sondeo S-1 durante los años 2002 y 2003.

Las lluvias caídas entre noviembre de 2001 y abril de 2002 (especialmente nov-dic-ene), produjeron, como mínimo, dos frentes de recarga. El primero se percibió en enero de 2002 y produjo la estabilización de la T del N-1 y una desaceleración en el descenso de nivel (Figura nº 5). El segundo frente, cuantitativamente más importante, se notó a partir de mayo de 2002, y provocó una nueva desaceleración en el ritmo del descenso de nivel y una ligera disminución en la C.E. del N-1.

El segundo período de lluvias intensas, concentrado en diciembre de 2002, generó un nuevo episodio de recarga, cuantitativamente más importante que el anterior; que fue capaz de invertir, en febrero de 2003, la tendencia evolutiva del nivel (Figura nº 5) y hacer que la C.E. del N-1 adoptara una tendencia descendente. Esta nueva recarga sería también responsable de la estabilización de la T de N-2 y N-3, las cuales hasta comienzos del año 2003 habían mantenido una tendencia creciente. Respecto de la evolución del cabe nivel destacar que, tras el cambio de tendencia de febrero, en julio se alcanzó un máximo relativo, con un ascenso de 1,08 m.

Lo observado en ambos episodios de recarga permite estimar velocidades de circulación a través de la zona no saturada de 2 a 10 m/día.

Reinterpretando las medidas de nivel freático realizadas con sonda manual en el sondeo S-1, en el intervalo 1994-1999, se infiere que las lluvias habidas en el año hidrológico 1995/96, serían las responsables de la contención en los descensos de nivel medidos en el sondeo en el año 1996 (descenso anual 0,02 m). Variación que se estima habría resultado más evidente de no haber coincidido con un período de considerable aumento en las extracciones (en 1997 un 58 % superiores a las de 1994).

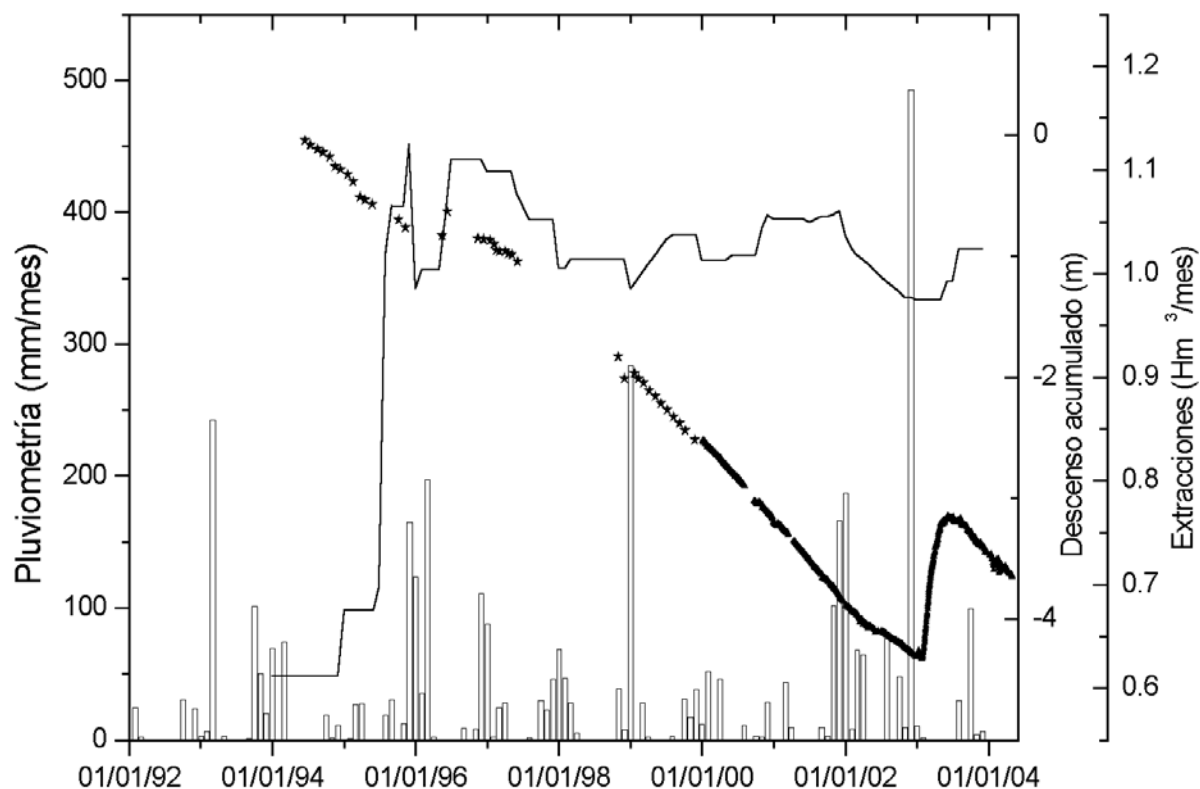


Figura nº 5. Se muestra, de forma conjunta, la pluviometría mensual (barras) estimada para la mitad oriental de Las Cañadas del Teide, las medidas de nivel freático efectuadas, de forma manual, en el sondeo S-1 (★) y las registradas en la EAD (▲) y la evolución de las extracciones en las galerías que alumbran en esa porción del acuífero (—).

La discontinuidad en las medidas de nivel efectuadas en el sondeo S-2, aunque no permiten correlaciones de detalle con la recarga, evidencian que en esta zona, situada a más de 1 km de cualquier alumbramiento, pero relativamente próxima a la zona de descarga del acuífero, no se perciben recuperaciones de nivel.

Por otro lado, las circunstancias del alumbramiento en la galería Bco. de Vergara entre junio y agosto de 1996, y sus repercusiones en la galería Vergara II, permiten inferir, aplicando la Ley de Darcy, una permeabilidad del orden de 130 m/día.

Tomando como referencia la permeabilidad indicada y considerando una potencia saturada de 300 m, se obtiene una transmisividad de  $40.000 \text{ m}^2/\text{día}$ . Como valor de referencia, cabe señalar que en el acuífero de Los Rodeos, desarrollado en materiales basálticos con similares características, en base a ensayos de aforo, se deducen transmisividades de  $20.000 \text{ m}^2/\text{día}$  y caudales específicos superiores a  $300 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  (Farrujia, I., 2003). Las estimaciones precedentes no pretenden ser una cuantificación precisa de la trasmisividad, sino indicativas de su orden de magnitud.

## 6. CONCLUSIONES

De lo observado en la mitad oriental de Las Cañadas, entre enero de 2000 y abril de 2004, destacar que:

- El nivel freático mantuvo una tendencia general descendente. En la porción central de la depresión el retroceso neto ha sido de 1,13 m (descenso medio en el sondeo S-1, 2 cm/mes); disminución que se acentúa hacia el N-NE al aproximarnos al área de descarga del acuífero, con un descenso neto de 10,5 m (descenso medio en el sondeo S-2 de 22 cm/mes).
- En las actuales condiciones de explotación, en años lluviosos, con precipitaciones superiores a la media anual (368 mm) y dependiendo de la distribución de las lluvias, la recarga puede desacelerar el ritmo de los descensos. Tras lluvias excepcionalmente intensas (493 mm en diciembre de 2002) la recarga es capaz de invertir la evolución descendente del nivel, produciendo periodos de recuperación con máximos aparentes.
- En los últimos 17 años no se ha registrado una precipitación similar a la de diciembre de 2002. Se considera que, de no haber sido por esta lluvia excepcional, el descenso medio en la porción central de la depresión habría estado entre 5-6 cm/mes.
- Se confirma una evolución creciente de la temperatura y, en menor medida, de la conductividad eléctrica de las aguas contenidas en el acuífero; no habiéndose determinado las razones de tal evolución. Esta tendencia general está temporalmente modificada por la llegada de la recarga.
- Para mejorar la correlación, entre la infiltración de la lluvia y su incidencia en el acuífero, es necesario disponer de estaciones meteorológicas completas que permitan realizar estimaciones directas de la recarga.
- A falta de confirmar con nuevos periodos de pluviometría intensa y con una caracterización más precisa de la recarga, se estima que el retardo en la llegada de las aguas de infiltración al acuífero es de entre 2 y 8 meses. Ello implica velocidades medias de circulación vertical, a través de la zona no saturada, de 2 a 10 m/día.
- La influencia entre alumbramientos permite inferir una permeabilidad efectiva, en la zona de descarga, de unos 130 m/día.
- Se obtienen nuevas evidencias de que la transmisividad en coladas basálticas recientes es considerable, con valores de referencia del orden de 20.000 m<sup>2</sup>/día.

## BIBLIOGRAFÍA

Braojos, J.J. (1997), *Definición de la recarga a través del balance hídrico en las Islas Canarias occidentales. Modelación*, Seminario "La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica", pp 267-277

Farrujia, I., Braojos, J.J., y Fernández, J. (2001a), *Ejecución de dos sondeos profundos en Las Cañadas del Teide*, VII Simposio de Hidrogeología de la Asociación Española de Hidrogeólogos. Murcia. Vol XXIII, pp 661 – 672.

Farrujia, I., Fernández, J., López, L.M., y González, S., (2001b), *Estación de adquisición de datos del sondeo de Montaña Majua. Las Cañadas del Teide*, VII Simposio de Hidrogeología de la Asociación Española de Hidrogeólogos. Murcia. Vol XXIII, pp 673 – 683.

Farrujia, I., (2003), *Situación de explotación de las aguas subterráneas en el Sector 722*. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Documento interno, no publicado. 16 p.

Navarro, J.M. y Coello, J. (1989) *Depressions originated by landslide in Tenerife*, ESF Meeting on Canarian Volcanism. Lanzarote, pp 150-152.