

INFLUENCIA DE UN VERTEDERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERACIÓN SOBRE UN ACUÍFERO FISURADO EN ENCODINA, VALIRA DEL NORD, PIRINEOS ORIENTALES (NW PRINCIPADO DE ANDORRA).

PONSA VIDALES, Àurea¹, GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ, M Carmen¹, PLANAS BATLLE, Xavier¹, TURU MICHELS, Valentí²

¹ DRYAS. Av. Príncep Benlloch 66-72, Ed. Interceus, Dptx 406-408. Andorra la Vella

² FUNDACIÓ MARCEL CHEVALIER. Av. Príncep Benlloch 66-72, Ed. Interceus, Dptx 308. Andorra la Vella

PALABRAS CLAVE: Ensayo de marcado e infiltración, trazador, isótopos, contaminación, RSU, escorias.

RESUMEN: Los primeros resultados del análisis geoquímico y ensayos de infiltración y conexión hidráulica de las aguas de los manantiales, pozos y torrentes próximos al vertedero de Encodina, han permitido establecer que la fuente es el punto de descarga de un flujo procedente del acuífero fisurado heterogéneo. Esta heterogeneidad favorecería la poca o inexistente conexión entre el vertedero y el manantial a pesar de la proximidad entre ambos.

INTRODUCCIÓN

En el sector de Encodina (NW del Principado de Andorra -fig. 1-) se han realizado ocho sondeos destructivos de reconocimiento con el objetivo de determinar la ubicación más idónea para realizar un pozo-captación por encima de la carretera C.G.3 y del vertedero de Encodina. La fuente de Encodina (Lambert III X:533767,7; Y: 36375,2; Z:1703) se descartaba inicialmente como posible captación puesto que queda por debajo de la carretera y cerca del vertedero (fig. 1), lo cual podría significar un alto riesgo de contaminación.

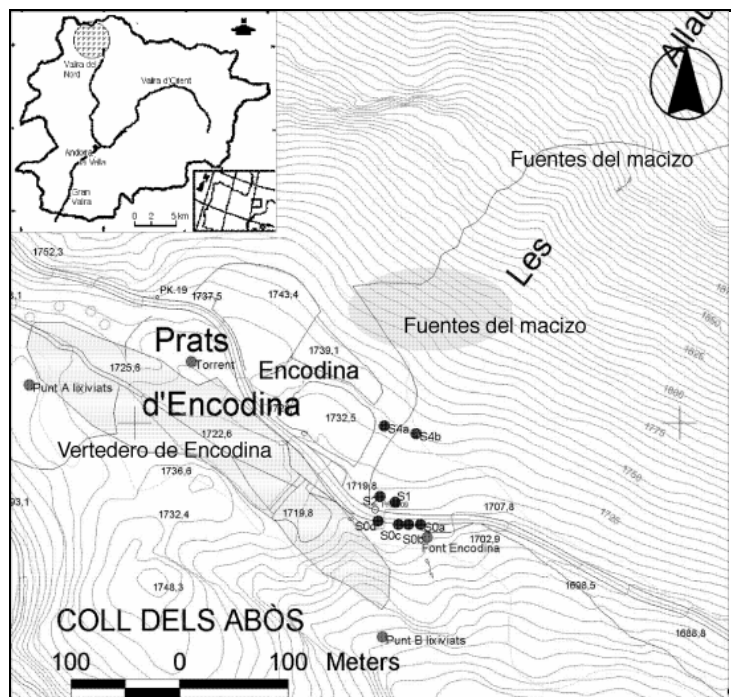


Fig. 1: Mapa de situación de los sondeos, fuentes y del vertedero de Encodina.

Previamente a la realización de los sondeos mecánicos se había llevado a cabo una cartografía geológica de detalle acompañada de una campaña de sondeos eléctricos. En seis de los sondeos mecánicos se encontró el nivel freático (S0a, S0b, S0c, S0d, S1, S4a), por lo que se entubó con rejilla filtrante buena parte de la zona saturada según el sondeo. En todos los sondeos excepto el S1 se perforó hasta encontrar el sustrato rocoso. Los sondeos S2 y S0d se interpreta que sólo tocan roca.

GEOLOGÍA

Según los resultados de la campaña de campo, en la zona afloran depósitos de coluviones del Cuaternario de potencia variable, genéticamente relacionados con un cono de deyección, que yacen por encima de unos esquistos (Unidad Superior del basamento hercínico del macizo del Astón), con intercalaciones de cuarcitas (Formación Ransol) de edad Cámbrico-ordovícico, sometidos a un metamorfismo intenso.

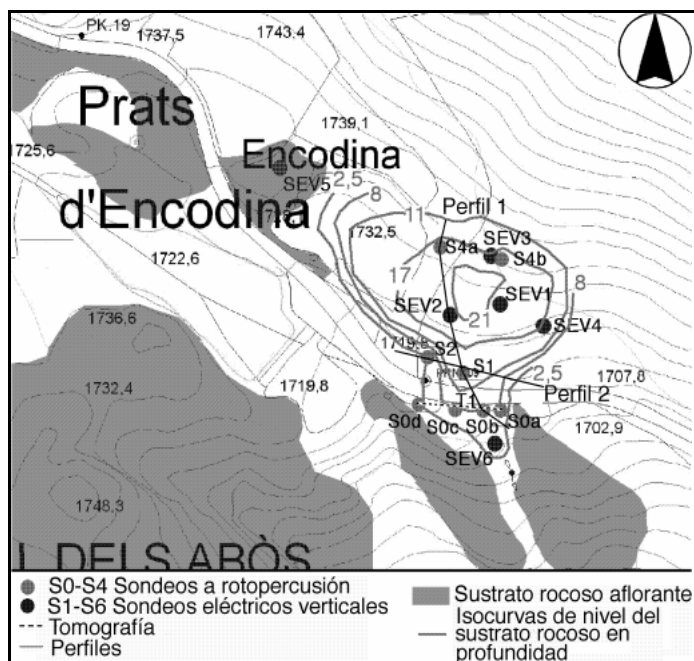


Fig. 2: Situación de los sondeos eléctricos verticales, perfiles y mapa de los afloramientos e isobatas del sustrato rocoso del sector.

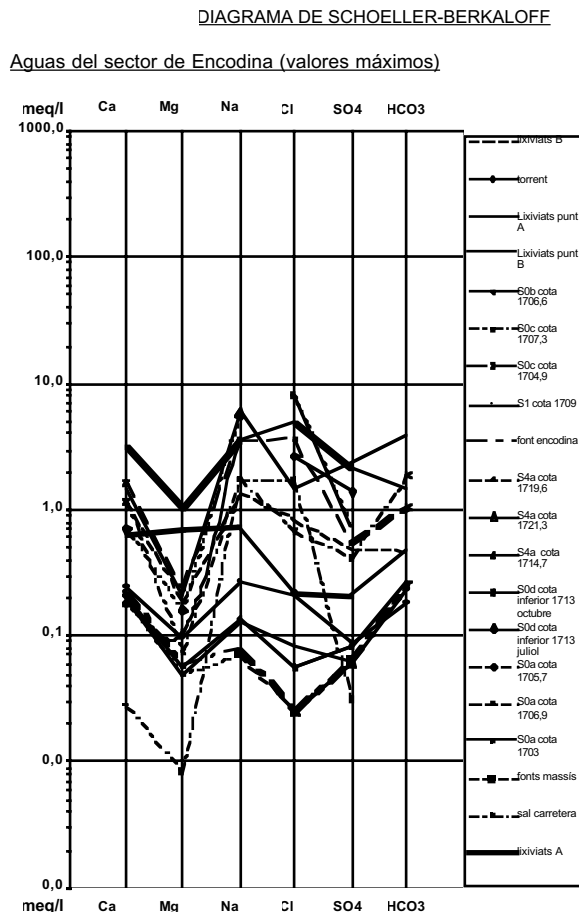
Se interpreta la existencia de un paleorelieve (producto de la erosión glacial del cuaternario) más deprimido entre los sondeos S4a, S1 y la fuente (fig. 2) en el que el agua circula preferentemente.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LAS AGUAS DE LA ZONA. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

Para poder caracterizar las aguas del sector de Encodina se realizaron varios análisis químicos de la fuente de Encodina, de los sondeos realizados y de los lixiviados procedentes del vertedero, durante los meses de Julio, Agosto y Octubre del 2003. En algunos de los sondeos se tomaron muestras a diferentes cotas. Asimismo también se disponían de análisis puntuales de los lixiviados en el año 1991, y de los análisis de auditoria de la fuente de Encodina del año 2003. Los sondeos que estaban secos en el momento del muestreo no se han tenido en cuenta.

Con los diferentes elementos analizados (no los mismos para todas las muestras ni todos con la misma precisión de análisis) se han hecho algunos gráficos con el objetivo de poder visualizar las posibles diferencias entre las aguas analizadas.

Las concentraciones de muchos de los elementos analizados estaban por debajo del límite de detección instrumental, por lo que se ha considerado el valor máximo posible para este límite como factor posiblemente más desfavorable.



Se han representado los elementos mayoritarios mediante columnas logarítmicas verticales (diagrama de Schoeller-Bekarloff - fig. 3).

Se observa como existe una gradación entre las aguas más mineralizadas (lixiviados punto A y B (2003), S0a, S0d, S0c en diferentes cotas) y las menos mineralizadas (fuente de Encodina, fuentes del macizo y los sondeos S1, S0b y S4a) con un bajo contenido en Cl^- , y alto en HCO_3^- y Ca^{++} .

Fig. 3: Gráfico Schoeller-Bekarloff de los elementos mayoritarios analizados en los diferentes puntos de muestreo.

De los elementos minoritarios, cabe destacar que las aguas del vertedero en el punto A coinciden concentraciones significativas de Al, Mn y As, mientras que en el punto B el Mn y el As están por debajo del límite de detección. Ambas aguas no contienen Pb. Las aguas de las fuentes muestreadas (Imacizo y Encodina) presentan valores muy bajos en Al, Fe, Mn, As y Pb. Respecto a los sondeos el contenido varía en función de la muestra.

Otros componentes analizados son nitratos, nitritos e ion amonio. Se ha observado como los lixiviados contienen valores altos de estos componentes, así como los sondeos S0c y S0a en diferentes cotas. El sondeo S4a en profundidad y S0d contienen nitritos y amonio pero no nitratos. Tanto la fuente de Encodina como las fuentes del macizo y los sondeos S1 y S4a en superficie están libres de estos componentes.

El pH de las aguas de todo el sector presenta unos valores comprendidos entre 6,45 y 7,75.

También se han analizado las diferentes relaciones iónicas, de las cuales las más significativas han sido:

	rCl/rCO ₃ H	Kr
Lixiviados A 1991	0,47	0,51
Lixiviados. B 1991	1,80	0,62
Torrente 1991	1,20	0,20
Lixiviados A 2003	0,39	2,82
Lixiviados B 2003	3,36	1,86
S0b superior	0,22	0,24
S0c superior	0,36	1,59
S0c profundo	3,44	1,21
S1 superior	0,37	0,22
Fuente Encodina	0,10	0,27

La relación entre $rCl/rHCO_3^-$ pone de manifiesto una similitud entre los valores de los lixiviados B (1991) y los del torrente (1991), que podría confirmar la idea de que el flujo del torrente, una vez infiltrado drena hacia el punto de salida donde se recogen los lixiviados B. De igual forma hay una similitud entre los lixiviados punto B (2003) y las aguas profundas del sondeo S0c, lo cual podría indicar una conexión.

El parámetro Kr (índice usado para identificar las aguas contaminadas o muy mineralizadas) es alto en las aguas del sondeo S0c y los lixiviados (2003), mientras que las aguas de la fuente, de los sondeos S1, S0b y torrente presentan un índice muy bajo.

Las aguas del S1 y del S0b pueden estar afectadas por las aguas superficiales contaminadas de la zona (prados, carretera, esta última debido a la sal vertida sobre la misma para evitar la formación de hielos durante los periodos invernales) aportando Cl⁻ y Na⁺ en cantidades superiores a las de la fuente; el sondeo S4a contiene Cl⁻, NO₃⁻, algo de Na⁺, con lo que se interpreta que puede recibir aportes de escorrentía de los prados pero no de la carretera.

Las aguas de los sondeos S0a, S0c y S0d presentan altos contenidos en Cl⁻, y Na⁺ que se relacionan con la escorrentía superficial (carretera principalmente) y la poca renovación de sus aguas. Presentan concentraciones superiores a la de los sondeos S0b y S1, relacionados con una mayor renovación.

La alteración del sustrato puede generar Ca, Mg, Al, etc. El sondeo S1 y la fuente contienen estos elementos en baja concentración, pudiendo deberse a aportes naturales. Respecto a estos elementos podemos formular dos hipótesis: a) la primera será suponer que el vertedero proporciona Al y Mn entre otros elementos y afectarían como mínimo al sondeo S0c. La degradación de la roca aportaría Al y afectaría como mínimo a los sondeos S1 y S0b y a la fuente.; b) El vertedero genera exclusivamente el Al y el Mn y contamina a todas las aguas sin excepción. Esta segunda opción quedaría anulada si miramos los demás parámetros.

Conjuntamente con los análisis químicos se dispone de algunos resultados isotópicos de las distintas aguas de la zona.

Las muestras de D y ^{18}O se analizaron en la *Unitat d'anàlisi geoguímica i d'isòtops estables de la Universitat de Barcelona (UB)*, utilizando las técnicas usuales basadas en la espectrometría de masas. Las precisiones de las análisis son de 2 a 3 ‰ para el δD y de 0,15 ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$.

Muestra	Fecha de recogida	δD (‰)	δO^{18} (‰)	ΔD
Font Encodina	23/07/02	-73,6	-11,22	16,16

El resultado de esta muestra es coherente con los valores que se conocen para las aguas de otras fuentes de la ladera que oscilan entre -73,9‰ y -76,2‰ para δD y -10,88‰ y -11,31‰ para $\delta^{18}\text{O}$ (Ponsa, et al., 2002).

Considerando un gradiente de -0,29 ‰ por cada 100 metros de altitud (Arce et. al. ,2001), se llega a una cota media de recarga de 2095 metros, es decir una cota situada unos 400 metros por encima de la fuente.

En relación con el tritio, las muestras se analizaron en el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA) del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), mediante el método de concentración electrolítica con medida final por centelleo líquido.

Muestra	Fecha de recogida	Concentración de Tritio (UT)	Error
Fuente Encodina	10/6/03	6,34	$\pm 0,86$
Torrente	10/6/03	6	$\pm 0,64$
Sondeo S4a	10/6/03	6,73	$\pm 0,67$
Lixiviados B	10/6/03	6,87	$\pm 0,69$

Se observa que todas las muestras presentan valores similares entre sí. Según Plata y Araguás,1999, se trata de aguas procedentes de las precipitaciones de los últimos años, indicando que las aguas subterráneas de la zona se renuevan con gran rapidez, como era de esperar.

ENSAYOS DE VELOCIDAD DEL FLUJO Y DE CONEXIÓN HIDRÁULICA

Con el objeto de identificar a los niveles más permeables interceptados por los sondeos y obtener información aproximada sobre la magnitud de los flujos, se realizaron en todos los sondeos ensayos de dilución basados en el marcado de toda la columna de agua usando como trazador una solución saturada de sal común. En la primera serie de ensayos, se comprobó que el sondeo S4a presentaba la mayor velocidad del flujo subterráneo (más rápida renovación del agua), seguido del S1. El resto de sondeos presentaban velocidades despreciables del flujo subterráneo, lo cual, dada la proximidad del manantial Encodina, reflejaba por sí sólo una ausencia de conexión con éste. Posteriormente se llevó a cabo la repetición del ensayo en el sondeo S4a, interpretando la existencia de un flujo horizontal localizado por debajo de los 13 metros.

A la vista de los resultados anteriores, se realizó un primer ensayo de interconexión hidráulica entre el sondeo S4a y la fuente utilizando como trazador sal común disuelta en agua. Se inyectaron 125Kg de sal. Por dificultades técnicas, la inyección se prolongó durante una hora. El trazador llegó a la fuente en un tiempo próximo a 1 hora de iniciada la inyección (tiempo $t = 0$) y se obtuvo la curva de salida que se muestra en la figura 4.

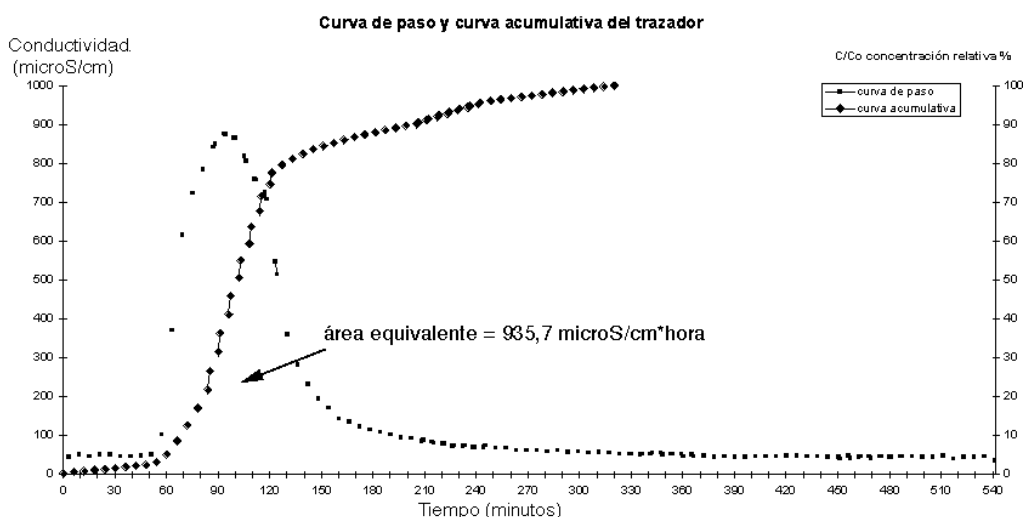


Fig. 4. Curva de salida por la fuente del trazador inyectado en el sondeo S4a.

Las curvas de salida del trazador por la fuente (curva real y acumulativa) permiten calcular las distintas velocidades del flujo que se resumen en la tabla siguiente. Para ello se ha supuesto una distancia mínima entre el sondeo S4a y la fuente de 116 metros.

Velocidad máxima	Velocidad dominante	Velocidad efectiva*
t=50 minutos	t=95 minutos	t=100 minutos
3300 m/día	1760 m/día	1670 m/día
* Calculada como media del tiempo dominante y del tiempo equivalente a $C/C_0=0,5$ (105 minutos)		

El gradiente hidráulico establecido entre el sondeo S4a y la fuente es de 0,13, lo cual significa una conductividad hidráulica de 3850 m/día, si se aplica la ley de Darcy, considerando una porosidad propia de medios granulares igual a 0,3 (Jiménez y de Justo, 1975).

La masa M de trazador recuperada en la fuente viene dada por la siguiente expresión, si se considera que la por la fuente aflora un caudal constante Q :

$$M = Q \int C dt = C_m \cdot \Delta t \quad (1)$$

donde la expresión integral representa el área de la curva se salida del trazador por la fuente, la cual puede considerarse equivalente a la de un rectángulo de altura C_m y base Δt .

El caudal medio de la fuente aforado en distintos momentos de la experiencia fue de $1400\text{m}^3/\text{día}$. Con este dato se obtiene que solamente se recuperó, aproximadamente, un 30% de la sal inyectada en el sondeo.

En junio de 2004 se realizaron nuevos ensayos de interconexión. Con el objetivo de comprobar la conexión entre los sondeos S4a y S1 y la fuente se inyectaron 100 gramos de fluoresceína sódica en el sondeo S4a. Pasados 30 minutos de la inyección, el trazador es detectado visualmente en el sondeo S1, y pasados unos 38 minutos se detecta en la fuente. En los sondeos S0a y S0c no se detectó en ninguna de las lecturas hechas en las inmediatas horas. En el sondeo S0b se detecta el colorante, pasadas unas horas, pero muy diluido.

Asimismo se repitió la inyección de sal común en el sondeo S4a. Se utilizaron en este caso 75Kg de sal común disueltos en agua. La inyección se realizó durante 82 minutos de manera muy discontinua. En la fuente se instaló un conductímetro automático programable, y en el sondeo S1 se realizaban lecturas puntuales de conductividad en pequeños intervalos de tiempo. Según las curvas de paso, el tiempo mínimo en detectarse la sal en el S1 fue de 30 minutos (fig. 5), y de 38 minutos en llegar a la fuente.

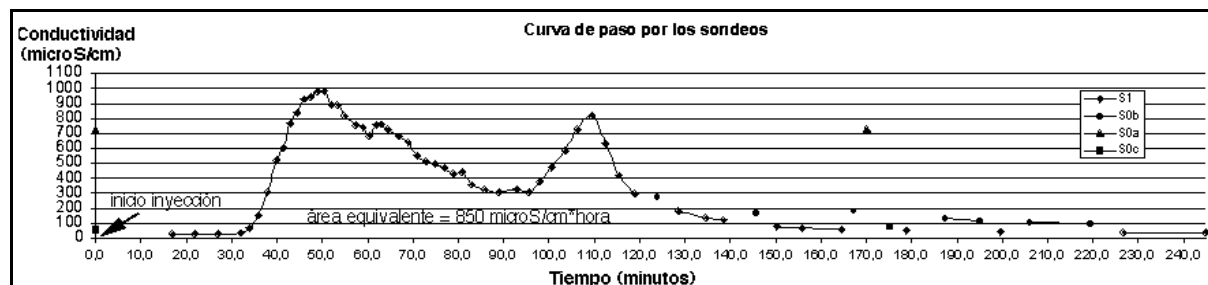


Fig. 5. Curva de paso por S1 de la inyección de sal realizada en el sondeo S4a. La aparición de dos picos se debe a que, debido a dificultades logísticas, el trazador se inyectó en dos lotes separados.

Según la curva de paso por la fuente, sólo se recupera un 23% de la sal inyectada (1).

Una vez se comprobó que el trazador inyectado en el sondeo S4a había pasado por la fuente, se inyectó 25Kg de sal disueltos en agua en el sondeo S1. En la fuente se instaló la sonda automática programable. Pasados 16 minutos de la inyección, el trazador llegaba a la fuente, obteniéndose la curva de paso que se muestra en la figura 6. La integración de esta curva de paso indicó que sólo se recuperó el 16% de la sal inyectada (1).

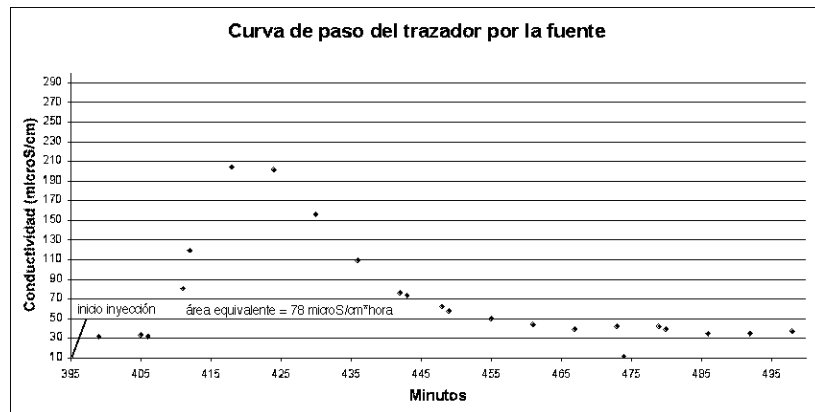


Fig. 6. Curva de paso por la fuente de la inyección de sal realizada en el sondeo S1.

Posteriormente a la realización de los ensayos de conexión hidráulica, se realizaron distintos aforos en el torrente que nace de la fuente, en diferentes puntos del mismo, observándose que el caudal aumentaba a medida que se alejaba de la fuente sin existir aportaciones externas. Este resultado indica que por la surgencia principal de la fuente no aflora la totalidad del caudal drenado de la ladera, lo cual explica, al menos en parte, la pequeña recuperación de trazador obtenida en las experiencias de conexión.

PIEZOMETRIA Y ANÁLISIS DEL CAUDAL

Desde Junio hasta Noviembre del 2003 se han tomado lecturas puntuales de la cota piezométrica en cada sondeo. Las variaciones de los niveles son mínimas, oscilando entre 0,2 metros en el sondeo S0b y 0,8 metros en los sondeos S0a y S4a. En todos los sondeos se registran niveles máximos en junio y mínimos entre agosto y octubre. La comparación de las lluvias (registros de la estación meteorológica de Les Salines, ubicada en el mismo valle de la fuente) con los niveles indica que éstos están condicionados por las lluvias y por la fusión de las nieves. En este período el caudal de la fuente ha registrado valores máximos en primavera $-3300\text{m}^3/\text{día}$ - (asociado a la fusión del manto nival) y mínimos en septiembre ($<300\text{m}^3/\text{día}$), sin llegar a agotarse. En el momento de niveles máximos se diseñó el mapa piezométrico. Las líneas de flujo van de las cotas más altas (ladera) hacia las partes bajas (sondeos S0 y fuente), en sentido SE. Este hecho indica que las aguas superficiales procedentes de la carretera y del vertedero pueden influir en los sondeos S0, S1 y fuente, quedando al margen los sondeos S4a y S4b.

El caudal infiltrado procedente de las precipitaciones producidas sobre los depósitos del Cuaternario se estima de $23.268\text{ m}^3/\text{año}$ ($63\text{ m}^3/\text{día}$ para una precipitación anual de 1200 mm, sin escorrentía y una evapotranspiración del 30% supuesta según resultados de estudios previos (Ponsa et al., 2002)).

Según la evolución del caudal de la fuente y la curva de agotamiento se interpreta que sólo el 8% podría proceder de la infiltración de las precipitaciones en el Cuaternario. Un 19% procede de la infiltración en la ladera del flujo procedente de

los torrentes (escorrentía superficial) y el 73% restante procede del flujo subterráneo que circula a través del sustrato rocoso. Esta última contribución explica el elevado valor obtenido para el coeficiente de conductividad hidráulica local, así como la elevada velocidad del flujo subterráneo que alimenta a la fuente. La escasa contribución del Cuaternario justifica el hecho de que el flujo subterráneo detectado en la mayoría de los sondeos (todos menos el S4a y S1) sea despreciable.

INTERPRETACIÓN

La composición química de las aguas subterráneas indica que existe un flujo preferente procedente de la ladera caracterizado por su baja mineralización, sin influencia de los lixiviados del vertedero. Este flujo se detecta, principalmente, en los sondeos S4a, S1 y en la fuente. Esta similitud en el quimismo también se observa en los ensayos de conexión hidráulica. En efecto, el flujo que corta el sondeo S4a, pasa por el sondeo S1 y descarga en la fuente. El sondeo S0b también intercepta parcialmente este flujo, mientras que el resto de los sondeos, a pesar de estar muy próximos a los sondeos mencionados anteriormente, se encuentran aislados del mismo y presentan por ello un quimismo muy diferente, con aguas mucho más mineralizadas. Ello es así, a pesar de que estos sondeos cortan la formación superficial formada por coluviones no cimentados. Los resultados indican, en definitiva, la existencia de fracturas preferentes de dirección NNW-SSE en el sustrato rocoso que actúan como canales conductores del agua. Estas fracturas han favorecido la existencia de depresiones lineales como se observa donde se encaja el torrente aguas abajo de la fuente (erosión glacial y aluvial) posteriormente rellenadas por los depósitos cuaternarios (el sondeo S1 corta uno de estos canales rellenos). Todas ellas confluyen hacia la fuente y torrente, dada la inexistencia de otras fuentes y ríos.

Existe una descarga subterránea procedente del macizo rocoso fisurado hacia la formación cuaternaria canalizada. Donde la topografía corta el canal principal de drenaje saturado se concentra la fuente. La descarga no es puntual, exclusivamente por la fuente sino lineal, siendo el torrente efluente.

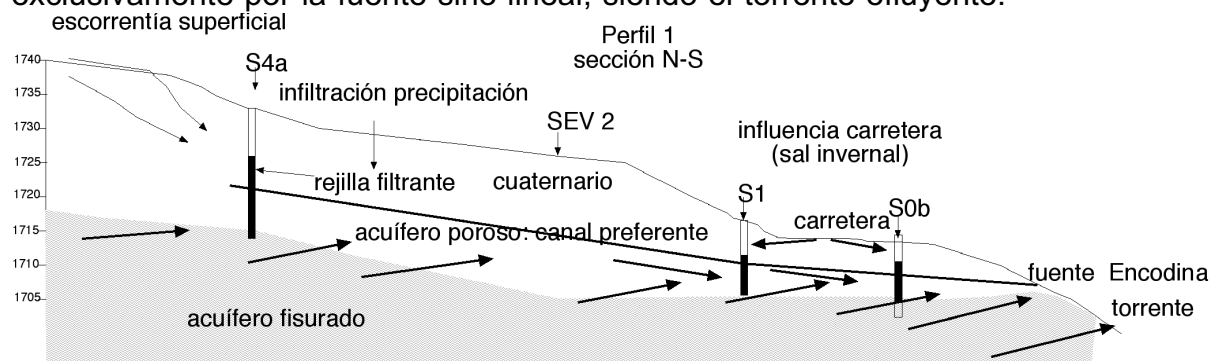


Fig. 7: Perfil realizado entre los sondeos S4a, S1, S0b y la fuente. Su situación se presenta en la figura 2.

El caudal medio de la fuente es de $800 \text{ m}^3/\text{día}$ equivalente a $0,56 \text{ m}^3/\text{min}$. Se trata en realidad de un caudal mínimo, ya que éste aumenta a medida que se desciende de cota.

El ensayo de conexión entre el sondeo S4a y la fuente proporcionó un tiempo medio de tránsito del agua igual a 100 minutos. Por tanto, el volumen de agua almacenado en el acuífero entre el sondeo y la fuente asciende a $0,56 \times 100 = 56 \text{ m}^3$. Como la distancia entre el sondeo y la fuente es de 116 metros, ello significa que la sección media del flujo subterráneo que alimenta a la fuente asciende a $0,48 \text{ m}^2$. Se trata, por tanto, de un flujo muy concentrado coherente con una circulación preferente del agua a través de las fisuras de la roca consolidada que constituye el sustrato.

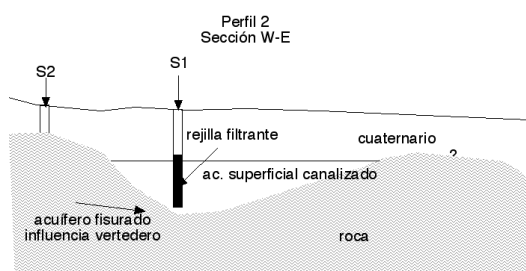


Fig.8: Perfil realizado entre los sondeos S2 y S1. Su situación se presenta en la figura 2.

El flujo procedente del macizo es suficientemente importante como para minimizar los aportes superficiales infiltrados directamente en la formación cuaternaria, susceptibles a estar contaminados por los vertidos de sal realizados en la carretera. Así mismo, el vertedero queda confinado dentro del sustrato rocoso fracturado poco transmisoro y aislado de la vía de flujo subterráneo que alimenta a la fuente, hecho este que favorece que los lixiviados no sean detectados en la fuente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, financiado por la Fundació Marcel Chevalier, se ha realizado con la colaboración de Antonio Plata Bedmar, que en todo momento nos ha estado asesorando acerca de los métodos e interpretaciones aquí presentados.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAGUÁS, L. y PLATA, A. (1999). Trazadores naturales en la identificación y caracterización del origen y dinámica de los flujos de agua en el entorno de presas y embalses.
- ARCE M., GARCÍA M.A. y ARQUED, V. (2001). Caracterización del oxígeno 18, deuterio y tritio en las aguas del Pirineo. Las caras del agua subterránea (Medina y Carrera, eds), Congreso en Memoria de Germán Galarza de 2001.
- PONSA, À., TURU V., GUTIÉRREZ M.C., GARCÍA J.C., i PALLARÉS C.(2002). Perímetres de protecció per un grup de quatre captacions al vessant d'Encodina. El Serrat. Parròquia d'Ordino. 94pp. Exp. D-020-ACO-039.07.02