

Comportamiento dinámico de las lagunas de Ruidera

ANTONIO PLATA BEDMAR (*), ELENA PÉREZ ZABALETA (**) y MARÍA FE DÍAZ TEJEIRO (***)

RESUMEN El comportamiento dinámico de las lagunas de Ruidera, así como de los manantiales y aguas subterráneas de la zona de influencia ha sido investigado aprovechando el largo período de sequía ocurrido entre 1993 y finales de 1995 y el período lluvioso que siguió a continuación. Como herramientas principales de trabajo se han utilizado aforos de flujos superficiales por métodos de trazadores, así como la medida de los cambios de composición química e isotópica del agua, incluyendo deuterio, oxígeno-18 y tritio. La determinación de los coeficientes de agotamiento de los dos manantiales que permanecían activos al final del período de sequía ha permitido obtener información sobre el proceso de secado total de las lagunas de aguas abajo. Los isótopos estables y el tritio han proporcionado información sobre la relación existente entre las lagunas y el acuífero carbonatado circundante, así como sobre la renovación de las aguas subterráneas en la zona central de éste.

DYNAMIC BEHAVIOUR OF THE RUIDERA LAKES

ABSTRACT *The dynamic behaviour of the Ruidera lakes, as well as of the springs and groundwater of its influence area has been investigated taking advantage of a long dry period occurred between 1992 and end of 1995 and the subsequent rainy period. Main working tools have been surface flow-rates measurement using tracer methods, as well as the determination of chemical and isotopic composition of water, including deuterium, oxygen-18 and tritium. The determination of the dry-up coefficients of the two springs that were active at the end of the dry period has provided information on the time for complete drying of the downstream lakes. The stable isotopes and tritium have provided information on the relationship between the lakes and the surrounding carbonate aquifer as well as on the turnover time of the groundwater at the central area of the aquifer.*

Palabras clave: Ruidera, Lagunas, Manantiales, Secado, Recuperación, Deuterio, Oxígeno-18, Tritio.

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se realizó dentro del marco de un convenio firmado con la Dirección General de Obras Hidráulicas para la realización de estudios en el Alto Guadiana. Las lagunas de Ruidera constituyen la principal vía de descarga del acuífero carbonatado de Campo de Montiel perteneciente a la Unidad Hidrogeológica 04-06. Se trata de un conjunto de 15 lagunas situadas de forma encadenada en la zona central del acuífero, las cuales se encuentran conectadas entre sí a través de flujos superficiales cuando las precipitaciones locales y los niveles piezométricos del acuífero lo permiten. En algunos casos, las lagunas se encuentran interconectadas también por flujos subterráneos. Las aguas que rebosan de las mismas descargan en su tramo final en el embalse de Peñarroya. La longitud total del tramo comprendido entre la primera laguna (laguna Blanca) y este embalse asciende a unos 20 km. Durante mucho tiempo, este sistema hídrico ha

funcionado como el nacimiento del río Guadiana, pero esta situación ha cambiado recientemente debido a la utilización total de sus recursos hídricos con fines de regadío.

Debido al corto tiempo de renovación del agua del acuífero donde se encuentran enclavadas las lagunas, los volúmenes almacenados y los caudales vertidos por éstas varían fuertemente en función de la pluviometría local. Ello hace que, en períodos de prolongada sequía, muchas de estas lagunas experimenten drásticos descensos de nivel, dejando de rebosar y, en algunos casos, llegando a secarse totalmente. Esto fue lo ocurrido durante el período de sequía entre 1993 y finales de 1995, cuya magnitud se ilustra en los diagramas de la figura 1. El presente estudio describe el comportamiento dinámico de las diferentes lagunas, incluyendo el agotamiento de sus reservas como consecuencia de la sequía mencionada y su recuperación durante el posterior período lluvioso. El estudio está basado en las investigaciones realizadas durante los años 1994 a 1997 haciendo uso, entre otras, de las siguientes técnicas: a) aforo de caudales utilizando rodamina WT como trazador; b) análisis químico del agua, tanto en campo como en laboratorio; c) medida de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18; d) medida del tritio natural del agua; y e) medida de flujos subterráneos en sondeos mediante marcado del agua con sal común. Por razones de espacio, se omiten los fundamentos teóricos en que se basan estas técnicas, remitiendo al lector a la referencia Plata (1997).

(*) Licenciado en Ciencias Químicas.

(**) Jefe de Servicio de Proyectos técnicos. Centro de Estudios de Técnicas aplicadas del CEDEX.

(***) Director de Programa. Centro de Estudios de Técnicas aplicadas del CEDEX.

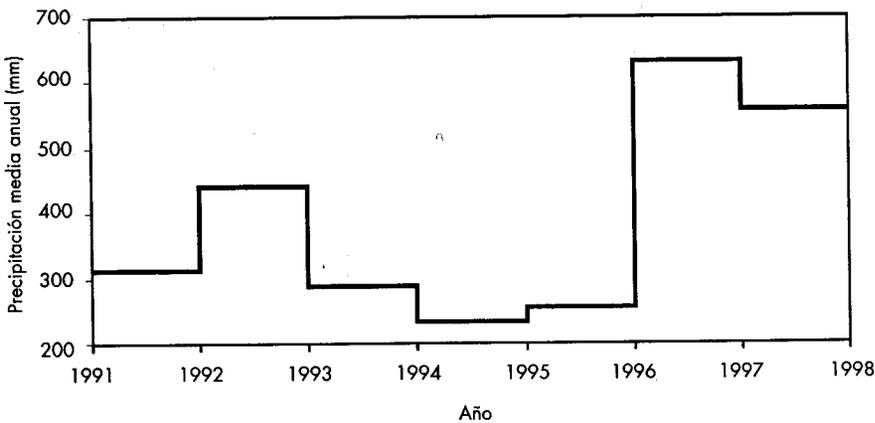
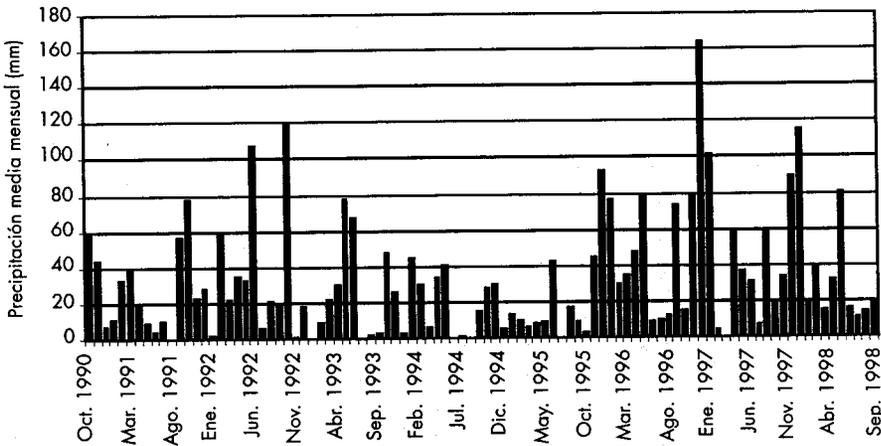
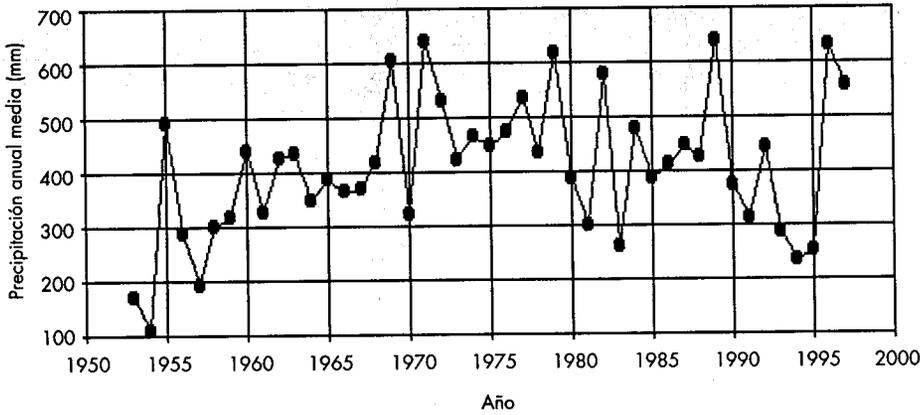


FIGURA 1. Precipitaciones anuales en la zona de estudio en diferentes periodos de tiempo.

2. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

El acuífero Campo de Montiel está formado, principalmente, por calizas y dolomías del Lias Inferior y tiene una superficie próxima a 1200 km² (figura 2). El espesor medio de estos materiales calcáreos es de unos 80 metros, si bien puede variar entre 50 y más de 200 metros. El substrato impermeable está formado por materiales del Triásico, principalmente del Keuper, que consisten en margas y arcillas abigarradas con niveles yesíferos y de otros materiales evaporíticos. Los materiales calcáreos se encuentran casi al descubierto en la

mayor parte de la zona, lo cual facilita la infiltración del agua de las precipitaciones. La descarga del acuífero se realiza a través de numerosos manantiales situados en los bordes del mismo y, sobre todo, a lo largo de las lagunas de Ruidera localizadas en la zona central. Muchas de estas lagunas se encuentran rodeadas de materiales travertínicos situados a cotas más elevadas, reflejando su hundimiento progresivo. Las lagunas se encuentran a cotas comprendidas entre 770 y 900 m.s.n.m., presentando un gradiente hidráulico próximo al 2%.

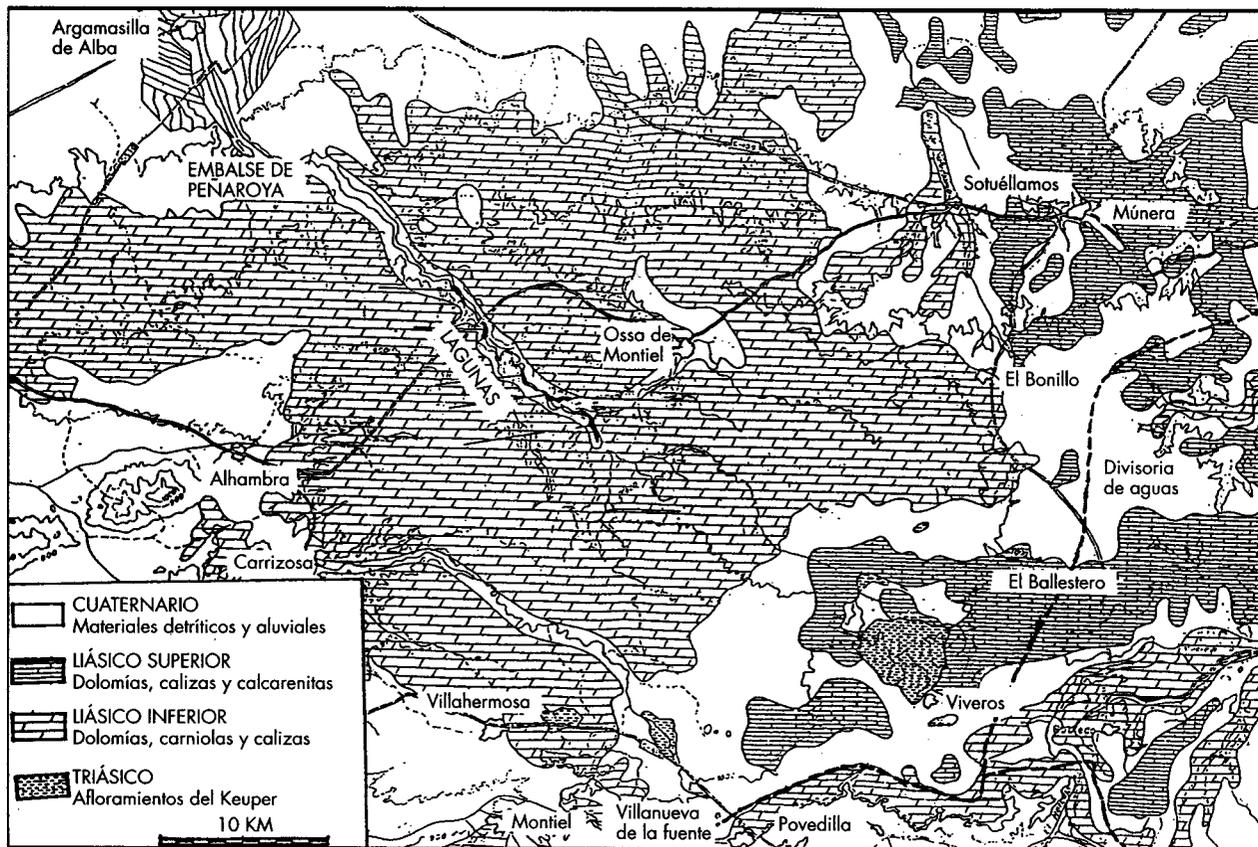


FIGURA 2. Geología de la superficie.

La transmisividad del acuífero obtenida por ensayos de bombeo realizados por el IGME ha proporcionado valores comprendidos entre 100 y 6000 m³/día, con los valores más altos concentrados en la zona central donde se encuentran las lagunas. El coeficiente de almacenamiento ha sido estimado en un 5% por Montero et al. (1989) y en un 4% por de la Hera et al. (1993). Debido a tratarse de un acuífero libre,

este coeficiente coincide, aproximadamente, con la porosidad. La precipitación media para el período 1953-98 ha ascendido 404 mm/año. La recarga total del acuífero ha sido estimada por el IGME en 135 Hm³/año (IGME 1985), la cual equivale a un valor medio de 112 mm/año.

La figura 3 muestra la variación del caudal descargado en el embalse de Peñarroya durante el período comprendido

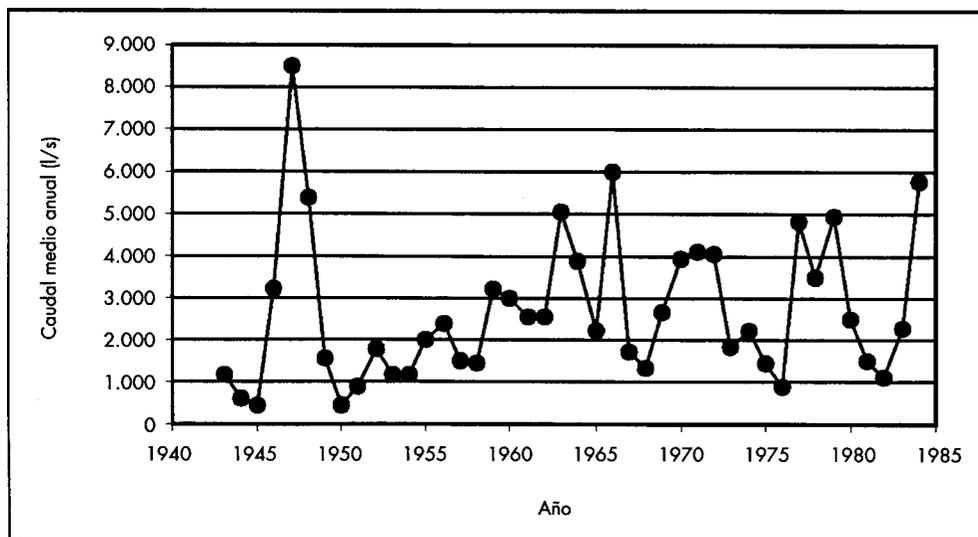


FIGURA 3. Variación del caudal descargado en el embalse de Peñarroya durante el período 1943 a 1984.

entre 1943 y 1984. El caudal medio asciende a $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual equivale a $82 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Lógicamente, hay que tener en cuenta que una fracción importante de esta descarga se origina por la escorrentía superficial de la zona. De acuerdo con los datos de la figura, la contribución del componente subterráneo estaría próxima a $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, a $47 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Este valor corresponde, aproximadamente, al caudal base obtenido en períodos de estiaje y sugiere que el área del acuífero que descarga a través de las lagunas debe ser próxima a $1200 \times 47 / 135 = 420 \text{ km}^2$, es decir, al 35% del área total. El resto de la descarga se produce a través de los bordes del acuífero y constituyen el origen de una serie de pequeños ríos, entre los cuales se encuentran los ríos Cañamares, Azuer, Jabalón, Segurilla, Córcoles, Pinilla y Villanueva de la Fuente. Curiosamente, este último, pertenece a la cuenca del río Guadalquivir.

Por otra parte, las medidas de la concentración de tritio natural del agua realizadas dentro del marco de este mismo estudio indican para el tiempo medio de renovación del agua del acuífero un valor próximo a 21 años (Plata et al., 1995). Como se sabe, este tiempo equivale a la relación existente entre el volumen de agua del acuífero y la recarga, es decir, representa el tiempo necesario para que toda el agua del acuífero sea substituida por el agua que se infiltra. Aceptando para la recarga el valor indicado anteriormente de 112 mm/año , el volumen del almacenamiento equivaldría a $2,35 \text{ m}$ de espesor de la lámina de agua. Si se acepta un valor medio de la porosidad igual al 5%, esta lámina de agua equivaldría a unos 47 m de espesor medio de la zona saturada. Sin embargo, los perfiles de la velocidad del flujo subterráneo medidos por los autores de este trabajo en los sondeos perforados en la zona de las lagunas indican que este espesor saturado asciende sólo a un valor medio de unos 28 metros con las lagunas llenas de agua. Por tanto, hay que admitir que, o bien la recarga es menor de 112 mm/año , o bien que la porosidad es mayor del 5% o bien que el tiempo de renovación es menor de 21 años. Distribuyendo el error entre estos tres parámetros, se llegaría a un ajuste coherente aceptando una recarga de 100 mm/año , un tiempo de renovación de 19 años y una porosidad del 6,8%.

Como era de esperar, la composición química de las aguas subterráneas corresponde a aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas saturadas en calcita y con concentraciones de ion Cl^- comprendidas entre 40 y 50 mg/l y de ion SO_4^{2-} entre 85 y 100 mg/l . Obviamente, estas últimas concentraciones se deben al contacto del agua subterránea con el substrato triásico.

3. PROCESO EVOLUTIVO OBSERVADO ENTRE 1994 Y 1997

La figura 4 muestra la disposición de estas lagunas de una forma esquemática. En ella se incluyen asimismo los principales ríos y arroyos que desembocan en las lagunas, así como los manantiales más importantes relacionados con éstas y los sondeos perforados en la zona. Los puntos correspondientes a sondeos y manantiales representan a veces a un conjunto de los mismos. Los puntos marcados dentro de los recuadros de las lagunas corresponden a manantiales situados dentro del propio vaso. Debe indicarse que las lagunas Cueva Morenilla, Colada y Cenagosa se encuentran situadas en el cauce del río y fuera del Parque Nacional de las Lagunas de Ruidera. El comportamiento de estas lagunas es irrelevante para el presente estudio.

Como indican las figuras 1B y 1C, el período de sequía se inicia a mediados de 1993 y termina a finales de 1995. Durante el mismo, se produjo un descenso general de los nive-

les piezométricos del acuífero y, como consecuencia del mismo, algunas lagunas se quedaron "colgadas" y, por tanto, expuestas a pérdidas por infiltración, además de las pérdidas por evaporación. La situación hidrológica encontrada durante el período de sequía entre 1994 y finales de 1995 se resume en los siguientes puntos:

- 1) Las lagunas Blanca y Redondilla se encontraban completamente secas. Evidentemente, ello fue debido al descenso del nivel piezométrico del acuífero por debajo de los fondos de los vasos respectivos, junto con la elevada permeabilidad de estos últimos.
- 2) Los arroyos Peñarribia, Caleruelas, de la Nava, Alarconcillo y de la Charca se encontraban, asimismo, secos.
- 3) Las lagunas Concejo, Tomilla, Tinaja, San Pedro, Lengua, Salvadora y Santos Morcillo contenían agua, pero sus niveles se encontraban en período de franco descenso debido a la evaporación. Este descenso se prolongó hasta finales de 1995. Los niveles piezométricos medidos en los sondeos de la zona indicaron que estas lagunas no se quedaron "colgadas", sino que los niveles del agua dentro de las mismas acompañaron, al menos de forma aproximada, a los niveles piezométricos locales del acuífero. El agua contenida en el interior de los sondeos próximos era agua del acuífero con una contribución de las lagunas nula o muy pequeña.
- 4) Las únicas lagunas que mantuvieron un nivel constante de agua fueron las lagunas Batana, Colgada y El Rey. Ello se debe, principalmente, a la descarga en el fondo de la primera de estas lagunas de un manantial importante, cuyo período de agotamiento es relativamente largo, tal como se analiza más adelante. Además de este manantial, la laguna Colgada recibía también los aportes del manantial Las Hazadillas, de elevado período de agotamiento. Aparte de estos dos manantiales, solamente mantenían caudales mínimos los manantiales Ojo del Hierro, Salvadora y Berbian (respectivamente, números 4, 7 y 12 en figura 4). El manantial Salvadora se secó del todo a finales de 1994 y lo mismo le ocurrió al manantial Berbian durante 1995.
- 5) Todos los sondeos, a excepción del marcado con las letras B y F, presentaban flujos verticales descendentes, indicando que estaban drenando aguas subterráneas de los niveles superiores del acuífero a los niveles inferiores y contribuyendo, por tanto, a la aceleración del secado de las lagunas próximas. La suma de los caudales drenados variaba entre 1250 y $1670 \text{ m}^3/\text{día}$. La mayor parte de este drenaje estaba localizado entre las lagunas de San Pedro y Lengua. Sin embargo, ninguno de estos sondeos, a excepción del indicado con la letra D, drenaban aguas de las lagunas, tal como demostraron los isótopos estables del agua deuterio y oxígeno-18. Por las razones expuestas, los sondeos fueron cementados por recomendación de los autores de este trabajo. La existencia generalizada de flujos verticales dentro de los sondeos sugiere la presencia de dos niveles de carstificación con diferentes niveles piezométricos. Los flujos verticales se originan por la conexión de ambos niveles a través de los sondeos. Las lagunas situadas aguas arriba de la Batana se alimentarían del nivel de carstificación superior. Lo contrario ocurriría en el caso de esta última. La profundidad de los sondeos variaba entre 30 y 50 metros .

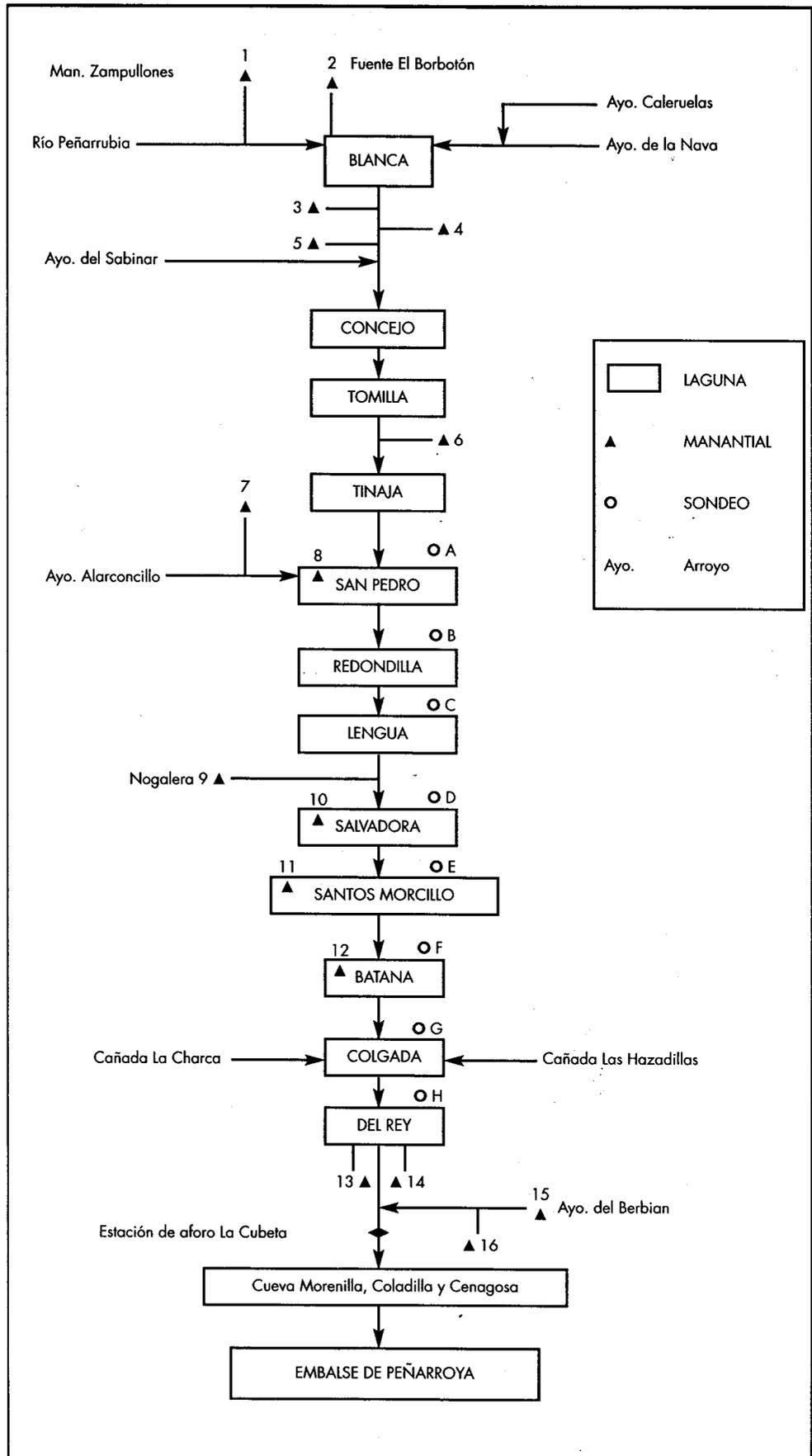


FIGURA 4. Esquema ilustrativo de la situación relativa de las lagunas mantiales y sondeos.

Las fuertes lluvias ocurridas a partir del 26 de Diciembre de 1995 representaron el inicio del período de recuperación de las lagunas y de los manantiales de la zona. El proceso de recuperación fue seguido a través de numerosas campañas de observación y de medidas, incluyendo la realización de aforos, determinación de los parámetros químicos de campo y laboratorio y análisis de los isótopos del agua: tritio, deuterio y oxígeno-18. Con un retraso de unos pocos días, se activaron los arroyos Peñarrubia, Caleruelas y de la Nava, así como el manantial el Borbotón (número 1 de figura 4). Estos aportes comenzaron el llenado de la laguna Blanca. Sin embargo, a pesar de la importante magnitud de dichos aportes (unos 550 l/s en total), el llenado de la laguna no se produjo hasta primeros del mes de Abril de 1996. Ello fue debido a que una gran parte del agua que llegaba a dicha laguna se infiltraba dentro del vaso, rellenando las cavidades cársticas que habían quedado vacías durante el período de sequía.

El caudal que escapaba de la laguna Blanca tardó en llegar a la laguna Concejo casi un mes, debido a la infiltración del agua en la zona intermedia. Sin embargo, hay que indicar que el nivel del agua en esta laguna comenzó a recuperarse inmediatamente después de producirse las precipitaciones de finales de Diciembre de 1995, sin que se observara en ningún momento la existencia de afloramientos situados por encima del nivel del agua. Ello indica que esta recuperación del nivel fue debida a la elevación del nivel piezométrico local del acuífero.

La entrada de agua por flujos subterráneos en las lagunas Tomilla, Tinaja, San Pedro, Lengua, Salvadora y Santos Morcillo fue también responsable de que los niveles en estas lagunas comenzaran a subir mucho antes de que llegaran los flujos superficiales y al poco tiempo después de comenzar el período lluvioso. En los casos de las lagunas San Pedro, Salvadora y Santos Morcillo, la recuperación de sus niveles se debió en parte a la descarga de manantiales visibles situados por encima del nivel del agua.

Las lagunas Batana, Colgada y del Rey no se vieron afectadas en sus niveles de forma importante por la sequía, debido a que se mantuvieron siempre llenas gracias a los afloramientos de aguas subterráneas del fondo de la laguna Batana y, en menor medida, al manantial Las Hazadillas.

4. BALANCE HÍDRICO DE LAS LAGUNAS

Se trata en este apartado de analizar las pérdidas o ganancias de agua de las lagunas, principalmente, una vez que éstas alcanzaron un estado de equilibrio con las formaciones acuíferas circundantes. Éstas fueron determinadas mediante aforos de los flujos superficiales en la entrada y salida de las mismas. Se usó para ello el método de aforo químico de integración de la nube de trazador utilizando como tal rodamina WT. Los fundamentos del método se describen en Plata, 1994.

La laguna Blanca experimentó unas pérdidas próximas a $4,1 \text{ Hm}^3$ entre el comienzo de su llenado y Septiembre de 1996. A partir de esta fecha, los niveles de los acuíferos locales quedaron restablecidos y las pérdidas desaparecieron del todo o, de forma más precisa, tomaron valores no detectables por los aforos. Un balance similar realizado conjuntamente para las lagunas Concejo y Tomilla (no se podía aforar el flujo intermedio) indicó unas pérdidas netas totales de $1,3 \text{ Hm}^3$ para el mismo período anterior. Igualmente, no se detectaron pérdidas a partir de Septiembre de 1996. Incluso, los resultados de los aforos sugieren una pequeña ganancia de caudal.

La laguna Tinaja reflejó ganancias en lugar de pérdidas, debido al afloramiento de agua en el vaso de la misma. Las

diferencias de caudal entre entradas y salidas indican que este afloramiento se inició en el mes de Junio de 1996 y en poco más de un mes se estabilizó en un caudal medio próximo a 350 l/s, el cual se mantuvo más o menos constante hasta la última campaña realizada en Octubre de 1997.

Las lagunas San Pedro y Redondilla reflejaron importantes pérdidas desde el primer momento en que quedaron llenas, lo cual ocurrió en Julio de 1996. Estas pérdidas se estabilizaron, respectivamente, en unos valores aproximados de 550 y 230 l/s y se mantuvieron sin cambios significativos hasta Octubre de 1997. Las lagunas Salvadora y Santos Morcillo no reflejaron pérdidas claramente detectables una vez que quedaron llenas.

El caso de la laguna Batana se analiza en el apartado próximo. La descarga de esta laguna se aforó dentro de un corto canal en forma de túnel perforado en el bloque calizo que la separa de la laguna Colgada. La descarga de esta laguna se aforó en el canal que existe dentro de los terrenos del hotel Entrelagos. El flujo superficial procedente de las lagunas superiores llegó a la laguna Batana durante Julio de 1996. La laguna Colgada presentó un balance equilibrado hasta Agosto de este año. Lógicamente, el caudal de entrada se obtenía sumando la descarga de la laguna Batana y la del manantial Las Hazadillas. A finales de Septiembre de 1996, la laguna presentaba una ganancia de caudal de 384 l/s. Esta ganancia se incrementó a 475 l/s en Noviembre de 1996 y a 814 l/s en Octubre de 1997. Lógicamente, hay que admitir que estas ganancias se deben al afloramiento en el fondo de la laguna de aguas procedentes del acuífero. Lo más probable es que las ganancias se deban, al menos en parte, a las aguas que se infiltran en las lagunas San Pedro y Redondilla. La confirmación de esta hipótesis exigiría la realización de una experiencia de interconexión basada en la inyección de trazadores apropiados (tritio artificial y/o fluoresceína) en estas lagunas.

El resultado obtenido para la laguna El Rey fue similar al obtenido en La Colgada. El balance se mantuvo equilibrado hasta Octubre de 1996. En Noviembre de este año, se detectó una ganancia de caudal de unos 130 l/s, el cual subió a 424 l/s en Octubre de 1997. El aforo de la descarga de esta laguna se realizó en la estación de aforos La Cubeta, restando para el balance el caudal aportado por el manantial El Molino situado entre esta estación y la laguna El Rey.

5. ACTIVACIÓN Y AGOTAMIENTO DE MANANTIALES

5.1. MANANTIALES EFÍMEROS

Como se ha indicado en el apartado 3, todos los manantiales situados aguas arriba de la laguna Lengua se encontraban secos a finales de 1995 como consecuencia de la prolongada sequía que se venía sufriendo. Las precipitaciones que se iniciaron, principalmente, a finales de Diciembre de este año ocasionaron la reactivación de estos manantiales. Como era de esperar, esta reactivación se produjo con un cierto retraso, el cual se refleja en la columna tercera de la tabla 1, que indica el momento de iniciarse el afloramiento del agua. Los tiempos de esta tabla muestran los días transcurridos a partir del primero de Enero de 1996. La columna segunda de la tabla ilustra sobre la situación relativa del manantial en el esquema de la figura 4. La columna cuarta indica los caudales máximos aforados en los diferentes manantiales y los valores entre paréntesis muestran los tiempos en que se alcanzaron estos caudales máximos. Las columnas quinta y sexta indican, respectivamente, los caudales aforados a los 330 días (finales de Noviembre de 1996) y a los 650 días (mediados de Octubre de 1997). Los valores de la primera de

Manantial	Punto en figura 4	Retardo desde 1/01/1996 (días)	Q _{maximo} (l/s) (días)	Q ₃₃₀ (l/s)	Q ₆₅₀ (l/s)
Zampullones(Río Peñarrubia)	1	40	280(120)	50	270
Arroyo La Nava	Cabecera	70	160(170)	54	130
Borbotón	2	90	170(175)	50	153
La Puerca	3	110	90(170)	30	76
La Cagurria	4	50	150(180)	110	129
Osero	5	110	420(180)	300	213
Telesfora	6	120	110(200)	76	135
Noguera	9	160	-	136	183
Salvadora	10	180	150(260)	63	-

TABLA 1. Datos relativos a la reactivación de diversos manantiales de la zona.

estas columnas representan, aproximadamente, los caudales reinantes al final del período de estiaje. El caudal de la fuente La Noguera aumentó de forma progresiva, sin que se produjera el descenso observado en las restantes una vez finalizado el período de lluvias de 1995-1996. Los datos de la tabla no precisan más comentarios. Sin embargo, se considera importante reseñar que las aguas que afloraron por todos los manantiales tenían conductividades, relativamente, elevadas con valores comprendidos entre 800 y 1000 mS/cm. Esta alta conductividad se debía sobre todo a la sobresaturación en las especies carbonatadas (calcita y dolomía) y a los elevados contenidos de los iones Cl^- y SO_4^{2-} . Las concentraciones del ion CO_3H^- variaban entre 280 y 450 mg/l, mientras que las medidas en el agua de las lagunas antes de iniciarse el período lluvioso variaba entre 110 y 180 mg/l. Esta diferencia se debe a la pérdida de CO_2 experimentada por el agua después de producirse su afloramiento, la cual lleva consigo la precipitación de CO_3Ca , que se deposita en el fondo de las lagunas.

5.2. MANANTIALES PERMANENTES

Como se ha indicado en el apartado 3, los manantiales de carácter permanente más importantes existentes en la zona son el manantial que aflora en el fondo de la laguna Batana y el manantial de Las Hazadillas. Ambos manantiales fueron la causa de que las lagunas Batana, Colgada y El Rey conservaran su nivel durante el prolongado período de sequía. Los caudales de ambos afloramientos presentaron importantes disminuciones durante el período de sequía. Así el caudal del manantial Batana pasó de 234 l/s en Octubre de 1994 a 184 l/s en Septiembre de 1995, mientras que el manantial Las Hazadillas pasó, en este mismo período, de unos 125 l/s a 34 l/s. El efecto de estas disminuciones de caudal se reflejó en la estación de aforos La Cubeta situada a corta distancia aguas abajo de la laguna El Rey y para la cual se dispuso de una información más amplia. El caudal en esta estación disminuyó durante el período de sequía de la forma que refleja la figura 5 en representación semilogarítmica. La pendiente de la recta proporciona un valor del tiempo nece-

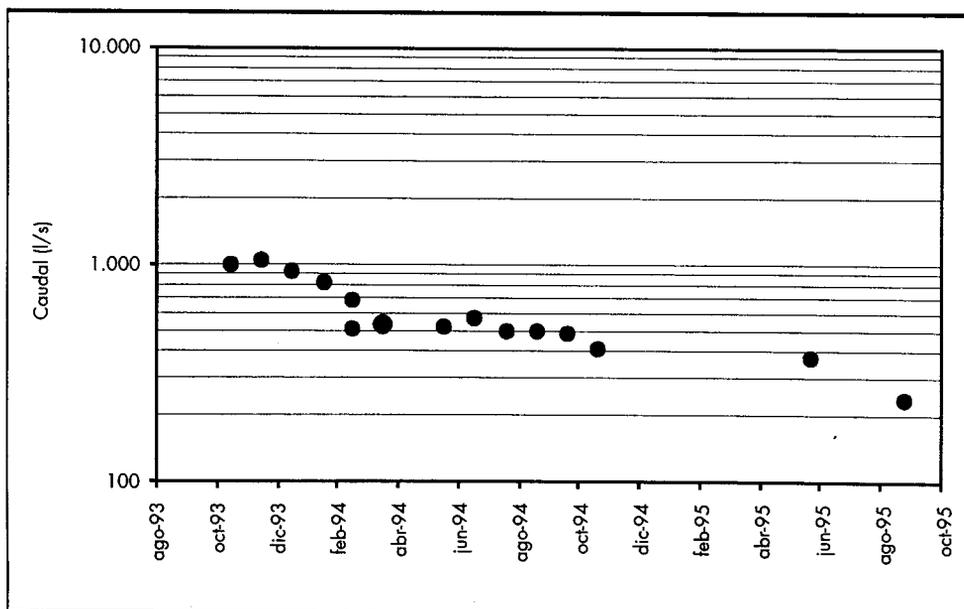


FIGURA 5. Variación del caudal en la estación de aforos La Cubeta durante el período de sequía.

sario para que el caudal disminuya a la mitad ($t_{1/2}$) igual a 1,25 años. En una sequía similar ocurrida durante el período 1944-1946, se obtuvo para este parámetro un valor de 1,67 años. La recta de la figura 5 proporciona el coeficiente de agotamiento a definido por la ecuación de Millet:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

donde Q_t es el caudal al tiempo t y Q_0 el caudal en un tiempo inicial del período de control.

El valor del coeficiente α se obtiene dividiendo el logaritmo neperiano de 2 (0,693) por el valor de $t_{1/2}$. Se obtiene así un valor a = 0,554 años⁻¹. La extrapolación de la recta de la figura proporciona los caudales que habrían sido aportados por los manantiales en caso de haber continuado el período de sequía. Por otra parte, las pérdidas por evaporación del agua en las tres lagunas puede calcularse suponiendo una tasa de evaporación media anual estimada a partir del balance de isótopos estables igual a 720 mm/año y una superficie aproximada de las mismas igual a 1,2 x 106 m². Se obtiene así una evaporación media equivalente a 27 l/s. Si a este caudal se suman los correspondientes a los dos manantiales juntos (13 y 14 de la figura 4), que ascienden en total a unos 30 l/s (valor aforado en repetidas ocasiones), se tienen unas pérdidas totales de agua iguales a 57 l/s. De haber continuado la sequía, este caudal se habría alcanzado, aproximadamente, en Junio de 1998. Por tanto, el nivel de las tres lagunas habría comenzado a decrecer en este momento. Lógicamente, el secado total de las mismas se habría prolongado durante un tiempo mucho más largo puesto que los caudales de los dos manantiales habrían disminuido en función del nivel del agua, pudiendo, incluso secarse del todo, dependiendo de la cota a la que se infiltre el agua dentro del vaso.

6. INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL TRITIO

Como se sabe, el tritio contenido en las aguas meteóricas de los últimos 50 años procede, principalmente, de los ensayos de armas nucleares realizados a cielo abierto a partir de 1953 y en una pequeña proporción de la generación natural de este radioisótopo en las capas altas de la atmósfera. Por tanto, el tritio informa sobre la presencia en el acuífero de aguas infiltradas durante el período indicado. La curva de la figura 6 muestra la concentración de tritio (valores medios

anuales) para las precipitaciones de Madrid entre 1953 y 1997. Se indican los valores corregidos por desintegración radiactiva referidos a este último año, es decir, los valores de concentración que tenían en 1997 las precipitaciones medias de los años anteriores. Estos valores se basan en las medidas directas realizadas por el CEDEX a partir de 1970 y, para el período anterior a este año, en los modelos conocidos para diferentes estaciones del Hemisferio Norte. Los datos de la figura pueden considerarse, aproximadamente, válidos para la zona del estudio.

La información más interesante proporcionada por el tritio se refiere al tiempo de renovación de las aguas del acuífero, para el cual se ha obtenido un valor próximo a 21 años (Plata et al., 1995). Los análisis de tritio realizados en muestras de agua tomadas en 1994 de cuatro lagunas dieron valores casi idénticos para ellas con un valor medio igual a 15,4 unidades de tritio (UT). Asimismo, las muestras tomadas en 21 sondeos situados dentro de la zona de influencia de las lagunas dieron un valor medio igual a 14,7 UT con una desviación media igual a 0,84 UT. Comparando estos valores con los reflejados en la figura 6, se observa de forma inequívoca que, tanto las aguas de las lagunas, como las aguas subterráneas de su zona de influencia contenían en 1994 fracciones importantes de aguas procedentes de las precipitaciones que tuvieron lugar entre 1962 y 1978. Las precipitaciones posteriores a este año tenían concentraciones medias próximas a 8 UT. Estos datos apoyan el valor antes indicado para el tiempo de renovación.

Por otra parte, doce muestras de agua tomadas durante los años 1996 y 1997 en las lagunas y en los manantiales próximos a las mismas dieron un valor medio de 11,5 UT con una desviación media igual a 0,9 UT. La disminución de concentración observada con respecto a las muestras de 1994 se explica, en parte, por la desintegración radiactiva del tritio (factor de desintegración próximo a 0,84) y, en menor magnitud, por la contribución en los puntos de muestreo de aguas procedentes de las precipitaciones recientes con una concentración media próxima a 8 UT. Estos datos ponen de relieve que la mayor parte de las aguas que discurren por la zona (lagunas y manantiales) durante los períodos secos son aguas del acuífero desplazadas del mismo por las precipitaciones de tiempo pasado.

La hipótesis anterior se ve apoyada por los cambios de salinidad observados en el agua de las lagunas. En efecto, la

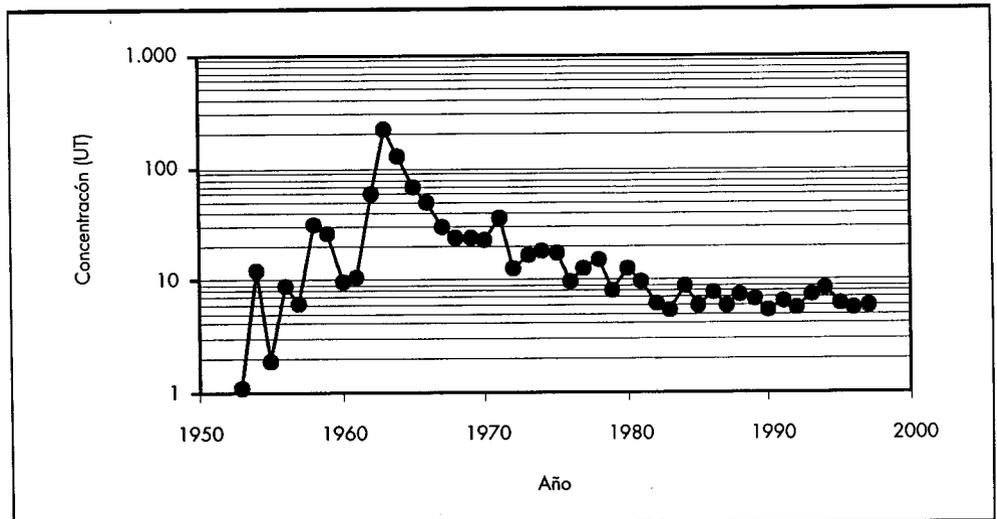


FIGURA 6. Concentraciones medias anuales de tritio medidas y/o calculadas para las precipitaciones de Madrid, las cuales son válidas para la zona del estudio. Los valores han sido corregidos por desintegración radiactiva hasta con referencia al año 1997.

conductividad de estas aguas debería haber decrecido por la llegada de aguas poco salinas procedentes de los flujos superficiales del período lluvioso. Sin embargo, en lugar de ello, las lagunas experimentaron durante 1996 un aumento considerable de conductividad, pasando, aproximadamente, de valores comprendidos entre 550 y 650 mS/cm a valores comprendidos entre 759 y 900 mS/cm. Es decir, el agua de las últimas precipitaciones originó, dentro del acuífero, el desplazamiento de aguas subterráneas de mayor salinidad que lo habitual, situadas, posiblemente, a niveles más profundos.

7. ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA

Los isótopos estables del agua deuterio y oxígeno-18 proporcionan información sobre el origen del agua. Como se sabe, los contenidos de estos isótopos en el agua se expresan en forma de desviaciones isotópicas δ dadas en tanto por mil por la expresión:

$$\delta_i = \frac{(R_i)_{muestra} - (R_i)_{smow}}{(R_i)_{smow}} * 10^3$$

donde el sufijo i representa a los isótopos deuterio (^2H o D) u oxígeno-18 (^{18}O), R es la relación existente entre el número de moléculas pesadas DHO o bien H_2^{18}O y el número de las moléculas ligeras $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ y las siglas SMOW corresponden al agua del océano utilizada como patrón internacional ("standard mean ocean water").

En el caso presente, el mecanismo principal que determina la composición isotópica relativa de los diferentes tipos de aguas de la zona del estudio es la evaporación, sobre todo, la que tiene lugar en las propias lagunas. En este proceso se produce un importante fraccionamiento isotópico debido a que la presión de vapor de las moléculas ligeras es mayor que la de las moléculas pesadas. Por tanto, las primeras escapan a la atmósfera de forma preferente en el proceso de evaporación. Ello hace que la mayoría de las masas de vapor generadas sobre el océano y, por tanto, las precipitaciones derivadas de las mismas tengan valores δ de signo negativo. En el caso de las lagunas, el proceso de evaporación hace que las aguas almacenadas en la misma se concentren en moléculas pesadas y, por tanto, que las desviaciones isotópicas δ se desplacen hacia valores menos negativos, pudiendo llegar a tener, incluso, valores positivos, como ocurrió en las lagunas Lengua y Salvadora.

La figura 7 muestra un diagrama que relaciona a las desviaciones isotópicas δD y $\delta^{18}\text{O}$ obtenidas para un conjunto de muestras en que se midieron ambos isótopos. Es un hecho bien comprobado que, debido a los fraccionamientos relativos de los dos tipos de moléculas pesadas, las aguas meteóricas del globo no alteradas por procesos de evaporación presentan composiciones isotópicas que se ajustan, de forma aproximada, a la ecuación $\delta\text{D} = \delta^{18}\text{O} + 10$. Como puede verse en la figura, los 34 puntos analizados se alinean a lo largo de una recta de evaporación que obedece a la ecuación $\delta\text{D} = (4,51 \pm 0,10)\delta^{18}\text{O} + (16,90 \pm 1,64)$ con un coeficiente de correlación r^2 igual a 0,98. El coeficiente angular de esta recta es típico de los procesos de evaporación. La intersección de ambas rectas se produce para una composición isotópica próxima a los valores $\delta\text{D} = -50\text{‰}$ y $\delta^{18}\text{O} = -8\text{‰}$. Esta es, aproximadamente, la composición isotópica media de las precipitaciones no alteradas de la zona del estudio, la cual concuerda satisfactoriamente con la que se deduce del mapa de distribución de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ elaborado por Plata (1994b)

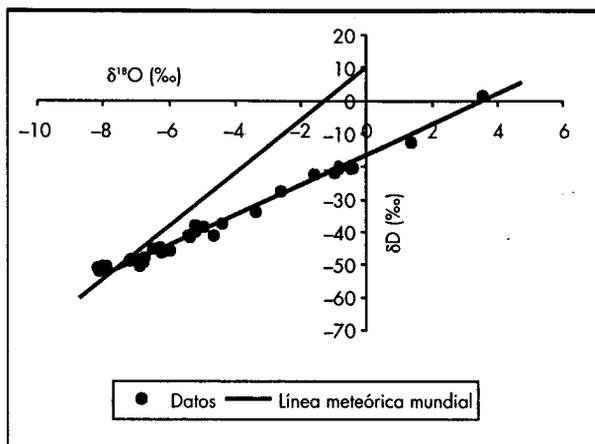


FIGURA 7. Diagrama que relaciona las desviaciones isotópicas δD y $\delta^{18}\text{O}$ (‰) para los diferentes tipos de aguas de la zona de estudio.

para las precipitaciones de la Península Ibérica. Esta hipótesis se ve confirmada por el hecho de que la mayor parte de las muestras de aguas subterráneas tomadas en pozos, sondeos y manantiales situados aguas arriba de las lagunas y en zonas alejadas de las mismas presentan valores de $\delta^{18}\text{O}$ próximos al valor antes indicado.

De acuerdo con lo anterior, no cabe duda de que todos los valores de $\delta^{18}\text{O}$ inferiores (menos negativos) a -8‰ corresponden a muestras de agua afectadas por el proceso de evaporación. De esta forma se explican los valores tan poco negativos, e incluso positivos, medidos en las lagunas que contenían agua durante el período de extrema sequía que estamos analizando. La figura 8 muestra la evolución de $\delta^{18}\text{O}$ en las diferentes lagunas a lo largo del estudio. En ella se observa el desplazamiento continuo de los valores de esta desviación isotópica hacia valores menos negativos producido en todas las lagunas situadas aguas arriba de la laguna Batana hasta finales de 1995. El aumento de la pendiente de la curva que se observa en el mes de Junio de este año se relaciona con el aumento de la evaporación de la estación estival. La tendencia hacia el enriquecimiento isotópico cambió, casi inmediatamente, después de iniciarse el período lluvioso en la misma fecha indicada anteriormente. Los valores absolutos de $\delta^{18}\text{O}$ alcanzados en las diferentes lagunas vienen determinados por la fracción de agua remanente en las mismas y, por tanto, por el espesor de la lámina de agua. El mayor fraccionamiento se produjo en la laguna Lengua, donde la desviación $\delta^{18}\text{O}$ alcanzó un valor de $3,55\text{‰}$.

Es importante reseñar que, en todas las lagunas, la recuperación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ se inició mucho antes de que llegaran a las mismas los flujos superficiales procedentes del rebosamiento de las lagunas de aguas arriba, si bien, en los casos de las lagunas Tomilla y Santos Morcillo, este proceso de recuperación isotópica fue muy lento hasta la llegada de los flujos superficiales. Obviamente, la recuperación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ demuestra la llegada casi inmediata a las lagunas de agua procedente de las formaciones acuíferas colindantes.

La situación en los casos de las lagunas Batana, Colgada y El Rey fue diferente, debido a que éstas se mantuvieron llenas todo el tiempo. La desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}$ en la laguna Batana se mantuvo constante hasta Junio de 1996 con un valor medio próximo a $6,40\text{‰}$. El descenso de valores observado entre este mes y Diciembre del mismo

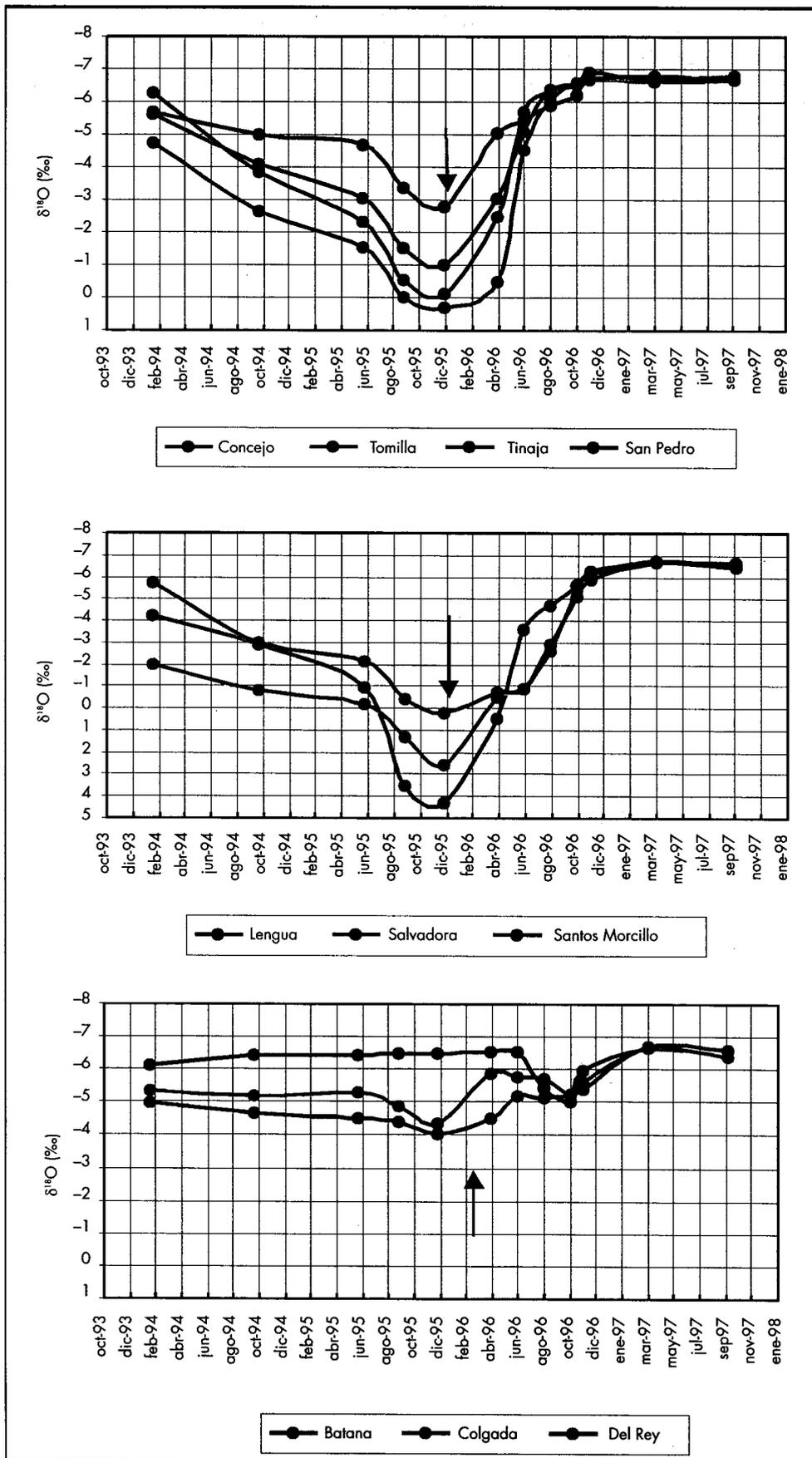


FIGURA 8. Evolución de la desviación $\delta^{18}O$ (‰) en las aguas de las lagunas durante el período del estudio. Las flechas indican el momento de finalización del período de sequía.

año se debió a la llegada de los flujos superficiales procedentes de las lagunas superiores con aguas mucho más enriquecidas en los isótopos pesados (valores d menos negativos). Una vez que todas estas aguas fueron substituidas por aguas nuevas en las diferentes lagunas, la composición isotópica se restableció en sus valores originales. En cambio, en las lagunas Colgada y El Rey, se produjo una caída de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ durante el verano de 1995, es decir, antes de que llegara la estación lluviosa que daba fin al largo período de sequía. Esto se explica por la disminución de los caudales aportados por los afloramientos de la laguna Batana y Las Hazadillas, junto con el aumento de la evaporación producido en la estación estival. La disminución de estos caudales hizo aumentar el tiempo de residencia o de renovación de las aguas en estas lagunas y con ello el efecto de enriquecimiento isotópico originado por la evaporación se hizo más patente. Posteriormente, la composición isotópica del agua de estas dos lagunas se vio afectada por la llegada a las mismas de los flujos superficiales y la situación sólo quedó totalmente restablecida en Marzo de 1997. Los valores menos negativos de $\delta^{18}\text{O}$ medidos en las lagunas Colgada y El Rey antes de Junio de 1995 con respecto a los de la laguna Batana se deben a la evaporación adicional producida en aquéllas.

Por otra parte, la figura 7 indica que todos los valores de $\delta^{18}\text{O}$ menos negativos de unos -8‰ corresponden a aguas que han experimentado un alto grado de evaporación. Obviamente, esta evaporación tiene lugar, principalmente, en las lagunas. A lo largo de los años 1996 y 1997 se analizaron unas 60 muestras de agua tomadas en estas últimas y en los manantiales próximos a las mismas. Todas estas muestras dieron valores comprendidos entre $-6,4$ y $-6,8\text{‰}$ (valor medio igual a $-6,60\text{‰}$) con la excepción de las muestras tomadas de algunos manantiales, tales como Zampullones, La Telesfora, Ojo del Hierro, Las Morretas, La Parra y el arroyo Alarconcillo, que dieron valores comprendidos entre -7 y $-7,45\text{‰}$. Estos resultados indican que todas las aguas que llegaron a las lagunas una vez terminado el período de sequía procedentes de las formaciones acuíferas circundantes fueron aguas que habían experimentado un alto grado de evaporación. La contribución directa a las lagunas de las precipitaciones a través de la escorrentía superficial fue despreciable, como demuestra el alto grado de mineralización del agua. Estos hechos sólo pueden explicarse admitiendo una estrecha relación en ambos sentidos entre las lagunas y las formaciones acuíferas circundantes. Esta relación bidireccional se ve favorecida por el elevado gradiente de los niveles piezométricos del acuífero, los cuales tienen un valor medio próximo al 2%. Por tanto, en períodos de lluvia, los niveles piezométricos en el acuífero suben por encima de los niveles de las lagunas, los cuales se mantienen constantes debido a estar rebosando. En cambio, en períodos de estiaje, los niveles del acuífero descienden rápidamente debido al elevado gradiente piezométrico, llegando a alcanzar valores más bajos que los niveles de las lagunas, los cuales siguen manteniéndose constantes gracias a los aportes superficiales procedentes de las lagunas de aguas arriba. Este proceso repetido cíclicamente hace que las aguas almacenadas en el acuífero en zonas próximas a las lagunas contengan, principalmente, aguas evaporadas procedentes de éstas. Estas aguas vuelven en parte a las lagunas durante el siguiente período de precipitaciones. Lógicamente, esto no sucede en las zonas del acuífero más alejadas de las lagunas, lo cual explica los valores de $\delta^{18}\text{O}$ más negativos de -7‰ encontrados en algunos de los manantiales. En estos casos, se trata

de mezclas de agua procedente de la infiltración directa de las precipitaciones con $\delta^{18}\text{O}$ igual a -8‰ con aguas evaporadas en las lagunas e infiltradas en el acuífero con $\delta^{18}\text{O}$ próximo a $-6,6\text{‰}$.

Por último, hay que mencionar que la similitud de la composición isotópica de las aguas que afloran por los manantiales Noguera (punto 9) y Salvadora (punto 10) demuestra que ambos se alimentan del mismo flujo subterráneo, lo cual parece lógico dada su proximidad. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ medidos en estos manantiales en Agosto de 1996 fueron, respectivamente, $-5,22$ y $-5,5\text{‰}$. Estos valores fueron variando lentamente hacia valores más negativos alcanzando valores próximos a $-6,6\text{‰}$ en Marzo de 1997. Esta evolución de la composición isotópica es muy similar a la experimentada por la laguna San Pedro a partir de Abril de 1996, lo cual sugiere que el agua de los manantiales puede proceder de esta última laguna. La laguna Redondilla debe descartarse, porque las primeras aguas que llegaron a ésta procedentes de la descarga de la laguna San Pedro dieron un valor de $\delta^{18}\text{O}$ igual a $-5,70\text{‰}$, el cual subió a $-6,27\text{‰}$ en menos de dos meses. Esto explica el resultado negativo obtenido en una experiencia de interconexión realizada en Abril de 1997, cuando se inyectó medio kilogramo de rodamina B en la laguna Redondilla con la intención de que fuera detectado en los manantiales anteriores.

8. CONCLUSIONES

Las lagunas de Ruidera se alimentan principalmente de la descarga de los niveles superiores de una zona central del acuífero Campo de Montiel, cuya extensión debe ser próxima a 420 km^2 . La contribución de la escorrentía superficial es mínima y sólo tiene lugar durante los períodos lluviosos. La relación entre las lagunas y el acuífero tiene un carácter bidireccional, es decir, el acuífero aporta agua a las lagunas durante los períodos lluviosos, mientras que durante los períodos de estiaje sucede lo contrario. Esto último es consecuencia del elevado gradiente piezométrico existente en esta zona central del acuífero (próximo al 2%) y del hecho de que las lagunas mantengan su nivel constante debido a los aportes de cabecera. El elevado gradiente hace que los niveles piezométricos desciendan rápidamente durante los períodos de estiaje.

El tritio natural del agua indica que el tiempo de renovación del agua (relación entre el espesor de la lámina de agua y la recarga) en esta zona central del acuífero es de unos 20 años. Debido a ello, el acuífero conserva, aun en períodos de extrema sequía, importantes masas de agua procedentes de precipitaciones de los últimos 30 a 50 años. Estas aguas se mezclan con las infiltradas en años sucesivos y van saliendo del acuífero de una forma más o menos exponencial. Las aguas descargadas en las lagunas y manantiales próximos a las mismas se encuentran sobresaturadas en calcita y dolomía, con valores de la conductividad próximos a $800\text{ }\mu\text{S/cm}$. Una vez que estas aguas afloran, se produce la pérdida de CO_2 y, como consecuencia de ello, la precipitación de CO_3Ca , siendo esta la causa de los importantes depósitos de este producto existentes en el fondo de las lagunas.

Con sequías de duración superior a unos tres años, tanto los manantiales de la zona central, como las lagunas existentes aguas arriba de la Batana se secan o entran en una fase de agotamiento rápido. Las lagunas Batana, Colgada y El Rey conservan sus niveles debido a los aportes subterráneos que recibe la primera de estas lagunas y a la descarga del manantial Las Hazadillas en la laguna Colgada. Estos

dos afloramientos tienen períodos de agotamiento mucho más largos que los restantes manantiales de la zona debido a encontrarse a cotas inferiores y a alimentarse de un flujo subterráneo más profundo. Dichos afloramientos se encuentran en el tramo inferior de la vía de descarga del acuífero. El coeficiente de agotamiento de ambos afloramientos es próximo a $0,554 \text{ años}^{-1}$. Los cálculos indican que las tres lagunas mencionadas entrarían, asimismo, en fase de secado, es decir, dejarían de rebosar, con un período de sequía total de duración comprendida entre 5 y 6 años.

Las lagunas San Pedro y Colgada presentan importantes pérdidas de caudal que, en condiciones de llenado total, ascienden, respectivamente a unos 550 y 230 l/s. En cambio, las lagunas Tinaja, Colgada y El Rey reciben importantes aportes subterráneos. En condiciones meteorológicas normales, tales como las que existían en 1997, los aportes respectivos ascienden, aproximadamente, a 350, 800 y 400 l/s. Lo más probable es que la mayor parte de los aportes de las lagunas Colgada y El Rey provengan de las pérdidas de las lagunas San Pedro y Redondilla. De ser así, los tiempos de tránsito del agua subterránea entre estas lagunas sería próximo a nueve meses para la laguna Colgada y a once meses para la laguna El Rey. Las lagunas restantes, aparte de la Batana, alcanzan una situación de equilibrio con el acuífero con unas pérdidas o ganancias de reducida magnitud y gobernadas por los cambios del nivel piezométrico.

REFERENCIAS

De la Hera Portillo, A., Llamas Madurga, M.R., y Cruces de Abia, J. (1993): *Ensayo de cuantificación de la conexión hidráulica entre el sistema acuífero del Campo de Montiel y el sistema acuífero de la Llanura Manchega*. Tesis de Licenciatura, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas.

IGME (1985): *Síntesis Hidrogeológica de Castilla La Mancha, Madrid*. Colección Informe, 107 pp.

Montero González, E., Martínez Alfaro, P.E. y López Camacho, B. (1989): *Influencia de las extracciones de agua subterránea en el Campo de Montiel sobre el Parque Natural de las Lagunas de Ruidera*. Congreso Nacional sobre la sobreexplotación de acuíferos, Almería, pp. 397-411.

Plata, A. (1994a): *Manual de fugas en embalses*, Monografías, ISSN 0211-6502, ISBN:

84-7790-335-2, 328 pág., CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid, 1994.

Plata, A. (1994b): *Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica*. Monografías, ISSN 0211-8203, M-39, CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid.

Plata, A., Pérez Zabaleta, E., Díaz Teijeiro, M.F., Luna Rodríguez, E. y Delgado Velasco, C. (1995): *Tiempo de renovación del agua en el acuífero cárstico de Campo de Montiel obtenido a partir del tritio de origen termonuclear*. VI Congreso de Geología de España, 18-22 Octubre 1995, Soria, España.

PUBLICIDAD

La cantera de Holcim en Foncalent (Alicante) obtiene Holcim el Primer Premio Nacional de Buena Imagen en Canteras

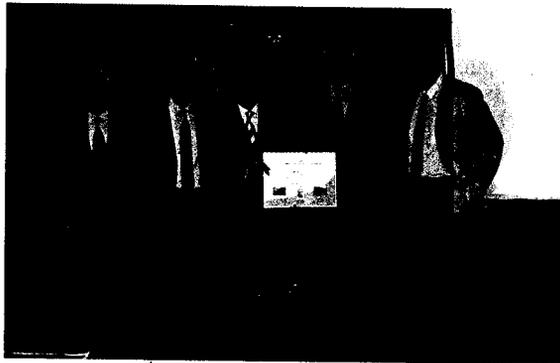
La Cantera de Holcim Áridos, perteneciente al Grupo Holcim España, en Foncalent (Alicante) se ha alzado con el Primer Premio Nacional de Buena Imagen en Canteras, en la categoría de Gran Cantera, que otorga la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA).

Este premio se otorga desde el año 2002, con carácter bienal, y tiene como objetivo fomentar una imagen moderna y promover una correcta gestión de las diferentes etapas del proceso de producción de árido mos-trando, de este modo, el compromiso con el Desarrollo Sostenible a través de actuaciones concretas en materia de medio ambiente, seguridad y calidad.

La cantera de Holcim en Foncalent ha sido reconocida por este premio como la mejor gestionada cumpliendo todos los requisitos en cuanto a labores de conservación de la vegetación de la zona, gestión de los residuos originados, control del polvo y

ruido, señalización, limpieza de la instalación, y otras actuaciones que permiten que esta cantera sea un ejemplo de cómo una explotación a cielo abierto está íntimamente ligada al desarrollo de su entorno tanto natural como social.

Holcim (España)S.A. es la empresa líder en el sector en cuanto a su política en Desarrollo Sostenible, prueba de ello son los varios premios nacionales e internacionales recibidos en reconocimiento a la gestión de sus instalaciones de áridos que por su preocupación en este campo.



De derecha a izquierda: Cipriano Gómez Carrión (Presidente de Anefa), Miguel Duarte (Director regional de áridos, Holcim), Roberto Huet (Director Comercial y de Marketing de Holcim), Jaime De Sivatte Alguero (Vicepresidente de Anefa), F. Javier Andrada Andrada (Vicepresidente de Anefa).

El Grupo Holcim (España) S.A., pertenece al Grupo Holcim, Ltd, con presencia en más de setenta países de los cinco continentes es uno de los líderes del sector de cemento, hormigón, áridos y mortero en España, donde gestiona más de veinte instalaciones de áridos repartidas por las Comunidades Autónomas de Andalucía, Murcia, Valencia, Madrid y Galicia.