

LOS VOLCANES DE BARRO O «SALSAS». FENÓMENOS HIDROGEOLÓGICOS DE INTERÉS ECOLÓGICO

F. González-Bernáldez*, P. Herrera** y C. Montes*

Recibido: octubre 1986

SUMMARY

Mud volcanoes and «salsas» in the iberian peninsula: hydrogeological phenomena of ecological interest

Mud volcanoes, mound spring craters and soapholes are hydrogeological formations that are not related to hydrothermal or volcanic phenomena despite being structurally similar. They appear in areas of groundwater discharge along with other landscape features characteristic of such areas. They appear due to the upward vertical movement of saline waters that cause clay dispersion and the perforation of confining low permeability layers. They are one of the most conspicuous of a group of genetically related landscape features («salgüeros», efflorescences, seepage areas, etc.) that are usually accompanied by flora and fauna characteristic of aquifer discharge ecosystems.

Key words: Mud volcanoes. Soapholes. Aquifer discharge. Discharge areas. Iberian peninsula.

RESUMEN

Los volcanes de barro, salzas, salsas (*mound spring craters*, *soap holes*) son formaciones hidrogeológicas que no tienen que ver con fenómenos hidrotermales o volcánicos aunque superficialmente sean semejantes. Aparecen, junto con otras características paisajísticas, en zonas de descarga regional de aguas subterráneas y se deben al componente vertical ascendente del agua salina que provoca la dispersión de la arcilla y la perforación de una capa confinante poco permeable. Son la manifestación más espectacular de un conjunto de características (salgüeros, ojos, rezumaderos, etc.) ligadas a veces genéticamente y que acompañan a una fauna y una flora características de los ecosistemas de descarga de acuíferos.

Palabras clave: Volcanes de barro. Salsas. Aguas subterráneas. Areas de descarga. Fenómenos hidrogeológicos. Península ibérica.

INTRODUCCIÓN

Las formaciones llamadas en la bibliografía española «salsas», «salzas», «macalubas» o volcanes de lodo, fangosos, cenagosos, barro-sos o volcancitos, consisten en pequeños cráteres de barro con pequeños flujos de agua salina y a veces sustancias sulfuradas y gases. Su aspecto es el de un pequeño volcán, habiéndose

relacionado frecuentemente en la bibliografía con procesos volcánicos o hidrotermales. Después de una época de frecuentes referencias a este fenómeno en la bibliografía española, se asiste a un período de silencio desde principio de siglo hasta la actualidad. Creemos que resulta interesante exponer el resultado de observaciones recientes, junto con la interpretación moderna del fenómeno y su relación con algunos procesos de interés ecológico.

* Dep. Ecología. Fac. Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid.

** Dep. Geología. Fac. Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares. Alcalá de Henares. 28071 Madrid.

HISTORIA

Las salsas o volcanes de barro constituyeron para los autores del siglo XIX un verdadero enigma. En España, la primera alusión a la existencia de estos volcanes se debe a Delanoue (según referencia de CALDERÓN, 1981, que no da, sin embargo, una cita concreta), mencionando los de Morón (Sevilla) y Conil (Cádiz).

MACPHERSON (1873) encuentra ya inactivos los volcanes de Conil, hallando en su lugar charcas saladas y manantiales salinos y sulfurosos o ~descubre, sin embargo, un gran cono entre Paterna y Alcalá de los Gazules en la misma provincia de Cádiz.

Machado, en una nota inserta en la traducción de la obra de SCHORDLER (1888) cuenta 10 de éstos «... salzas o mentecillos arcillosos, semejantes por su forma cónica a un pequeño volcán, por cuyo ápice son arrojadas a intervalos materias fangosas, agua y gases diversos, como el hidrógeno sulfurado, carburo de hidrógeno y cloruro de sodio en disolución».

Hay numerosas alusiones a estas formaciones en las obras de Calderón, que también los cita en la provincia de Alava (CALDERÓN, 1888) aunque no especifica la localidad. Visita los de Morón; encuentra sólo tres aún activos (CALDERÓN, 1891). REYES PROSPER (1915) transcribe este dato en su descripción de las «estepas béticas». En nota original añadida a su traducción de la obra de GEIKIE (1895), Calderón coloca los conos de barro y lodo de Morón junto a los fenómenos volcánicos (conos de tobas y cenizas) y los relaciona con la formación de ofitas. Posteriormente, sin embargo, tanto Calderón (BOLÍVAR & CALDERÓN, 1900) como HERNÁNDEZ PACHECO (1925) atribuyen el fenómeno a la presión de gases procedentes de descomposición de materia orgánica atrapada en bolsones durante los procesos de sedimentación.

MALLADA (1927) extracta la descripción de los volcanes de barro a partir de los trabajos de Calderón.

HUGUET DEL VILLAR (1937) cuenta seis «salsas» en Morón que asocia a manantiales y arroyos salados, todos ellos en comarcas con suelos de «bujeo» o «tierras negras». Como explica, sobre todo en su obra póstuma de reciente edición (HUGUET DEL VILLAR, 1983) las salsas son manifestaciones de fenómenos «hidro-hipogénicos» a los que concede gran importancia en su teoría edafogenética. Subraya el papel de la surgencia de aguas subterráneas en la génesis de muchos suelos; destaca entre ellos el «tirs» y las «manchas salina» del

interior de España» junto a características de suelos esteparios semejantes.

En la bibliografía internacional aparecen referencias más recientes que, junto con una cierta confusión del fenómeno de estos volcanes con procesos muy diferentes de tipo hidrotermal o volcánico (WHITEN & BROOKS, 1972) van distinguiendo el origen correcto del fenómeno. Así FAIRBRIDGE (1968) reconoce los «mound spring craters», de manifestaciones hidrotermales y volcánicas; les atribuye correctamente un origen hidrogeológico, debido a diferencias del potencial hidráulico de las aguas subterráneas, si bien limita innecesariamente su presencia a los acuíferos cautivos.

TOTH (1966) incluye las salsas, que describe con gran precisión, bajo el nombre local de «soap holes», entre los fenómenos característicos que denuncian las áreas de descarga de aguas subterráneas. El flujo causante del cráter se realizaría a través de una capa de material menos permeable que acaba siendo disgregado y perforado localmente por la tendencia ascendente del agua, propia de las áreas de descarga. Describe la evolución de estos procesos que considera previos a la formación de ojos de agua y manantiales en áreas esteparias como la por él estudiada «prairie» en Alberta (Canadá).

OBSERVACIONES ACTUALES EN LOS VOLCANES DE BARRO EN ESPAÑA

Se procedió a visitar recientemente el lugar descrito por Calderón, Mac-pherson, Machado y Hugué del Villar para los volcanes de barro o salsas de Morón, hallándolos convertidos en salinas. Únicamente restan algunos manantiales (uno de ellos con una construcción de ladrillo a modo de brocal) de los que fluyen sustancias orgánicas sulfurosas (color negro, olor fétido). Tampoco se ha tenido éxito en la confirmación de la presencia de las salsas de Álava y de Cádiz, que deben estar convertidas en manantiales u ojos de agua poco conspicuos.

Por el contrario, la exploración realizada permitió descubrir volcanes de barro todavía activos, así como signos de actividad reciente en el Tericario detrítico de la cuenca del Tajo en los términos de Hormigos y de El Casar de Escalona (Toledo).

Los tres volcanes de barro activos en la actualidad están situados en dos vaguadas confluyentes (fig. 1); ocupan una posición a media ladera entre la loma y el fondo de la vaguada. Esta tiene la forma alargada y sinuosa característica de las áreas no cultivadas por su encharcabilidad invernal, salinidad y presencia de un horizonte de acumulación de arcilla, que apare-

LOS VOLCANES DE BARRO O «SALSAS»

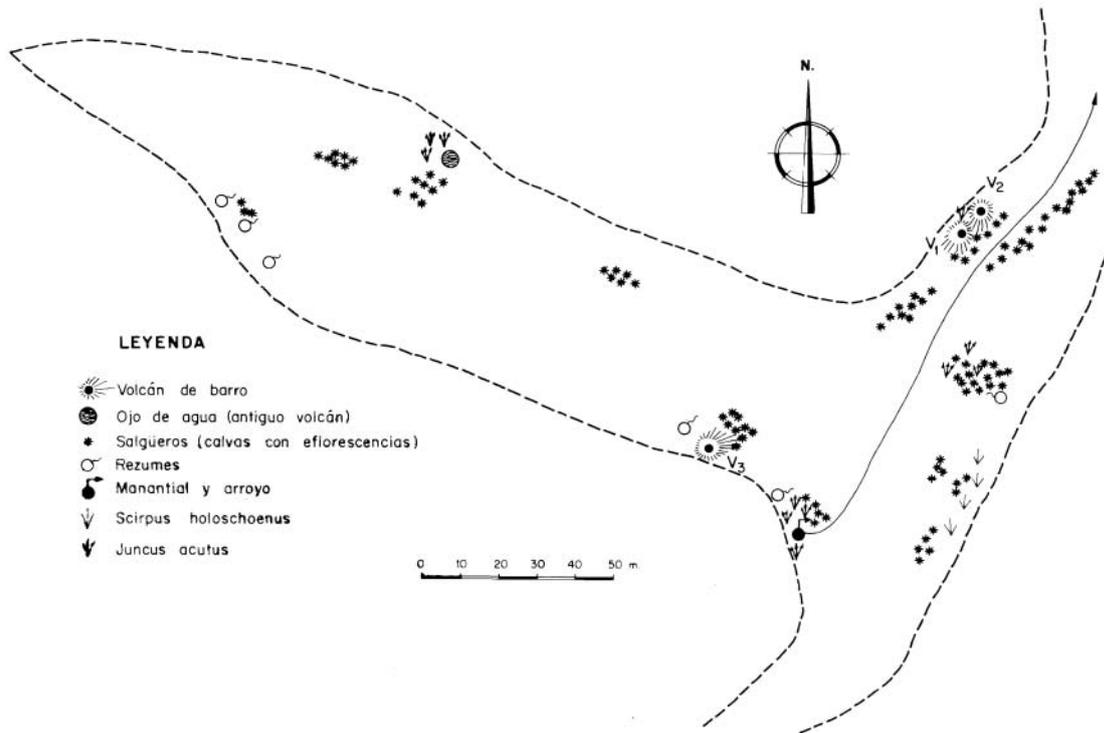


FIGURA 1. Esquema de las vaguadas donde se localizan los volcanes de barro activos. Las vaguadas forman una zona no labrada (línea a trazos), enclavada entre cultivos de cereales que corresponde a un área de descarga de aguas subterráneas.

Location of active mud volcanoes in meadows between cereal fields. The meadows form an area of groundwater discharge.

cen como frecuentes enclaves entre los cultivos de cereales en las zonas de descarga de aguas subterráneas en las dos submesetas (BERNÁLDEZ *et al.*, 1985). Los cráteres tienen un diámetro de 0'50 a 0'80 m. En su interior hay lodo viscoso (fig. 3) y un débil olor fétido y sulfuroso. El lodo es especialmente fluido en verano, período en el que resulta peligroso acercarse a esas formaciones por la facilidad con que se hunde la costra de barro reseca que le rodea. Se introdujo un tubo de 2 m de longitud en el barro sin lograr tocar fondo (fig. 2). De igual forma que TOOTH (1966) lo relata para los «soap holes», se observan huesos de animales en el lodo y se relatan casos de ganado (ovejas y cerdos) que han sucumbido en esos «hundideros». Este mismo fenómeno se aprecia en las arenas y marismas del Parque Nacional de Doñana (LLAMAS, 1987). En otro volcán de barro, hoy inactivo, en una zona próxima, una persona se hundió por accidente hasta la cintura, salvándose gracias al auxilio de otra per-



FIGURA 2. Volcán de barro en Hormigos (Toledo). La zona fluyente del cono está cubierta de una costra seca y finas eflorescencias. En su centro deja pasar una barra de más de dos metros de largo, sin encontrar fondo ni resistencia. En la foto *Juncus acutus*.

Mud volcano in Hormigos, Toledo. The active part of the cone is covered with a dry crust and fine efflorescences. A pole was introduced to a depth of over two metres in its central duct without reaching its base. *Juncus acutus* appears in the photo.



FIGURA 3. Volcán de barro en Hormigos (Toledo). Se observa (junto al hidón) flujo de barro reciente sobre la costra seca. Al fondo *Juncus acutus* indicadora de descargas moderadamente sódicas de la zona del acuífero de Madrid.

Mud volcano in Hormigos, Toledo. A recent mud flow covering the dry crust can be observed by the water carrier. The *Juncus acutus* present is an indicator of moderately sodic discharges from the Madrid aquifer.

sona que le acompañaba. Junto a los «volcanes» hay varios rezumes y un manantial que recorre una de las vaguadas.

El barro que mana en los volcanes, al secarse, va formando un cono casi desprovisto de vegetación (ocasionalmente con *Hordeum marinum*) y con eflorescencias de color blanquecino.

La composición del agua fluyente en las zonas de volcanes visitados, se muestra en la tabla 1. Es patente la diferencia entre la composición química del agua de los «volcanes» de Morón y los de Hormigos. La fuerte conductividad

y la razón monovalente: bivalentes de Morón son indicadores del paso del agua subterránea por materiales evaporíticos. Sin embargo, el alto cociente monovalente: bivalentes del agua de Hormigos, junto con su alto pH y la presencia de carbonatos parece indicar que la evolución del agua a lo largo de su flujo subterráneo se debe a procesos de «envejecimiento» o larga permanencia en contacto con materiales de tipo arcilloso no evaporíticos (RUBIO & LLAMAS, 1983; BERNÁLDEZ *et al.*, 1985), con pérdida de calcio y magnesio que se sustituyen por sodio, debido a fenómenos de cambio de bases, aumento del pH debido a hidrólisis de silicatos y consumo de oxígeno disuelto. El agua del arroyo corresponde a características más juveniles" y está asociado a flujos más superficiales (MOLINA, 1986). La presencia de estas características tan conocidas de la evolución hidroquímica del agua en flujos regionales constituyen una prueba decisiva del carácter hidrogeológico de estos volcanes de barro.

Dada la situación a media ladera, los conos son asimétricos, se desarrollan preferentemente hacia el fondo de la vaguada, con una pendiente de 10-20°, y el desnivel entre el cráter y la base de la falda es del orden de 1 m.

En otras zonas de la vaguada aparecen también pequeñas depresiones sin vegetación o con vegetación muy escasa, recubiertas de eflorescencias alcalinas (en mayo). Esas calvas de «tierra salitrosa» reciben el nombre local de «salgüeros», y están rodeadas de cinturas de halófitas; entre las más próximas a la calva figura *Puccinellia festuciformis* y *Plantago maritima*. Estas especies se presentan también en el borde del cráter, mientras que *Hordeum mari-*

TABLA 1. Composición iónica del agua de algunas muestras tomadas en las dos zonas estudiadas con volcanes de barro.

| | MORÓN ^a | | HORMIGOS ^b | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------|-----------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| pH | 6'3 | 7'1 | 8'4 | 9'8 | 8'3 | 9'7 | 8'3 |
| Conductividad mS.cm ⁻¹ | 128'0 | 48'0 | 3'8 | 6'6 | 2'0 | 2'1 | 1'0 |
| *Salinidad (TSD) 0/000 | 72'3 | 20'9 | 3'2 | 4'2 | 1'2 | 2'9 | 0'6 |
| Carbonatos meq l ⁻¹ | 0'0 | 0'0 | 0'0 | 8'6 | 0'1 | 3'2 | 0'0 |
| Bicarbonatos meq l ⁻¹ | 2'0 | 1'8 | 24'8 | 22'8 | 13'7 | 11'8 | 7'2 |
| Calcio meq l ⁻¹ | 235'5 | 22'0 | 0'8 | 0'4 | 0'5 | 0'5 | 0'6 |
| Sodio meq l ⁻¹ | 439'3 | 224'4 | 59'5 | 84'4 | 39'6 | 43'9 | 27'4 |
| Potasio meq l ⁻¹ | 12'9 | 2'2 | 0'1 | 0'2 | 0'64 | 0'2 | 0'03 |
| Cloruro meq l ⁻¹ | 1.060'0 | 234'1 | 10'0 | 19'5 | 3'1 | 3'9 | 1'2 |
| Magnesio meq l ⁻¹ | 50'0 | 22'0 | 0'4 | 0'2 | 1'1 | 1'8 | 1'4 |
| Sulfato meq l ⁻¹ | 413'2 | 270'0 | 6'7 | 9'7 | — | 7'4 | 4'4 |

Morón. 1: volcán; 2: rezumadero. Hormigos. 1, 2, 4: volcanes; 3: ojo; 5: arroyo. a: 20-11-1986; b: 29-IV-1986; c: Expresado en términos de total de sólidos disueltos.

TABLA 2. Inventarios de vegetación (10×10 m) en la zona de los volcanes de barro, Hormigos (Toldo). 1 y 2: área de los volcanes activos. 3: vaguada al oeste que contiene un antiguo volcán inactivo (fig. 1).

Vegetation inventory (10×10 m) in the area of mud volcanoes, Hormigos, Toledo. 1 and 2: area of active volcanoes. 3: meadow to the west containing an old, inactive volcano (fig. 1).

| | 1 | 2 | 3 |
|--|-----|-----|-----|
| <i>Asphodelus aestivus</i> Brot. | | | |
| <i>Carex divisa</i> Hudson | 2.2 | | |
| <i>Carex otrubae</i> Podp. | 2.3 | | |
| <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers. | 1.2 | 3.3 | 1.2 |
| <i>Dactylis glomerata hispanica</i> (Roth) Nyman | | 1.2 | |
| <i>Daucus carota</i> L. | | | + |
| <i>Eleocharis palustris</i> (L.) Roemer&Schultes | | | 1.2 |
| <i>Elymus repens</i> (L.) Gould | | 1.2 | 1.2 |
| <i>Foeniculum vulgare</i> Miller | | + | |
| <i>Hordeum marinum</i> Hudson | 2.2 | 1.1 | 1.2 |
| <i>Juncus acutus</i> L. | 1.1 | 2.3 | |
| <i>Juncus bufonius</i> L. | 1.1 | 1.1 | |
| <i>Juncus gerardi</i> L. | | | 1.2 |
| <i>Lolium perenne</i> L. | | | 1.2 |
| <i>Phalaris coerulea</i> Desf. | 1.2 | + | 3.2 |
| <i>Phalaris minor</i> Retz | + | + | 1.1 |
| <i>Phalaris paradoxa</i> L. | | | + |
| <i>Plantago coronopus</i> L. | 1.2 | | |
| <i>Plantago maritima</i> L. | 1.2 | 1.2 | |
| <i>Poa bulbosa</i> L. | | 1.2 | |
| <i>Poa trivialis</i> L. | 1.1 | 1.1 | 1.3 |
| <i>Puccinellia festuciformis</i> (Host) Parl. | 1.3 | 2.3 | |
| <i>Rumex conglomeratus</i> Murray | 1.1 | | |
| <i>Rumex pulcher</i> L. | | | + |
| <i>Scirpus holoschoenus</i> L. | | | 2.1 |
| <i>Scolymus maculatus</i> L. | | | + |
| <i>Trifolium resupinatum</i> L. | | | + |
| <i>Trisetum paniceum</i> (Lam.) Pers. | | | + |
| <i>Typha latifolia</i> L. | | 1.2 | |

num (anual) parece colonizar las áreas recientemente removidas e incluso algún punto del propio cráter.

En la tabla 2 se presentan inventarios de vegetación (cada uno es un cuadrado de 10 × 10 m), localizados los dos primeros en la zona de los volcanes (uno en el conjunto de los volcanes V₁, V₂ y otro en el v₃) y el tercero en la vaguada más grande, al W, donde existen restos de antiguos volcanes. Llama la atención la presencia de halófitas como *Puccinellia festuciformis*, *Plantago maritima* y *Juncus gerardi*, características de las zonas más salinas de las descargas regionales del «acuífero de Madrid» (BERNÁLDEZ *et al.*, 1985), y especies de las zonas alcalinas intermedias como *Juncus acutus* y en menor grado *Trifolium resupinatum* y *Phalaris coerulea* de zonas débilmente sódicas. En los fondos del arroyo se encuentran densos tapices de *Chara vulgaris* y *Zannincheilia* sp. En su conjunto, esa vegetación es característica de las descargas atribuibles a flujos relativamente profundos del citado acuífero, sobre el Terciario detrítico de la cuenca del Tajo. Existe el testimonio de conoedores de la

zona de que el ojo del agua presente fue anteriormente un volcán de barro.

En las inmediaciones, existen por lo menos tres áreas sobre las que hay testimonio de haber tenido volcanes activos en el pasado reciente. Una de ellas ha sido destruida por obras de construcción de una carretera de concentración parcelaria con el depósito de grandes cantidades de piedras y tierras para el paso de la carretera, pero presenta en sus inmediaciones depresiones con eflorescencias y mal crecimiento del cereal en ellas.

Algo semejante ocurre en otra de las zonas próxima a una antigua laguna relativamente extensa, a dos kilómetros de Hormigos, hoy día convertida en una depresión labrada con eflorescencias en verano y mal crecimiento de la cebada en algunas de sus partes. Otra de las localidades es una pequeña vaguada no labrada donde existen salgueros. La vegetación es semejante a la indicada; existe un ojo de agua permanente y algunas áreas pequeñas donde el suelo se reblandece extraordinariamente en invierno.

Todas las zonas con testimonios pasados o

actividad reciente de volcanes de barro indicadas se encuentra en un área característica, con descarga regional del acuífero de Madrid en la región Maqueda-Hormigos-Escalona. En esa zona se presentan numerosos enclaves salinos con vegetación característica y las aguas subterráneas reflejan claramente en su composición un proceso de evolución geoquímica, típico de los flujos subterráneos largos (sustitución del Mg y Ca por el Na, aumento del pH, aumentos moderados del Cl y de la conductividad, BER-NÁLDEZ *et al.*, 1985).

LOS VOLCANES DE BARRO Y FENÓMENOS ASOCIADOS EN LAS ÁREAS DE DESCARGA DE ACUÍFEROS

Como TOTH (1966) indica, se trata de fenómenos puramente hidrogeológicos cuya causa fundamental es es componente vertical ascendente del agua subterránea en zonas de descarga. Junto con los «salgüeros», las depresiones con eflorescencias, las áreas de suelo reblandido con arcilla dispersa, y los ojos de agua constituyen manifestaciones de un mismo mecanismo: el flujo ascendente y la movilización de la arcilla por el agua sódica. Esta dispersión y suspensión del arcilla por el agua sódica ascendente explica las características de «hundidero» de la salsa, así como el afloramiento del barro y la progresiva disgregación y final perforación de la capa poco permeable a que debe su origen. Los volcanes o salsas parecen ser según varios testimonios muy concordante~ etapas pasajeras muchas veces relacionadas genéticamente con «ojos» y otros tipos de depresiones. Si bien en la forma espectacular que le hace merecer su nombre son relativamente raros, las salsas ponen de manifiesto la presencia de aguas surgentes salinas cuya manifestación más usual es más discreta como la formación de salgüeros y probablemente la génesis de otros tipos de depresiones y cauces. La remoción del substrato favorece la presencia de anuales colonizadoras como el citado *Hordeum* y es una manifestación de excepción del dinamismo que da lugar a mosaicos y celularidad en estas áreas salinas, del que los «salgüeros», o calvas, son también una manifestación corriente.

No se han explorado en relación con estos flujos (que implican con frecuencia el ciclo del azufre y la materia orgánica) los procesos microbiológico~, aunque es posible que tengan cierto interés.

Las salsas tienen importancia por poner de manifiesto los mecanismos que subyacen al endorreísmo, poniendo en evidencia el compo-

nente vertical ascendente del agua en esas zonas (FETTER, 1980) y su capacidad para impedir el drenaje o movimientos descendientes de las aguas meteóricas. En su libro póstumo, HUGUET DEL VILLAR (1983) evoca las salsas en apoyo de su teoría sobre las causas de las características hidromórficas de ciertos suelos, el impedimento del drenaje a la vez por surgencia de aguas profundas y la argilización «desde abajo», aunque no acierte a explicar los mecanismos de subida de esas aguas, que empezarían a aclararse en fecha posterior a su trabajo. El papel de los flujos subterráneos en la génesis de suelos salinos y alcalinos hidromorfos en contraposición con las aguas meteóricas fue ya evocado por Glinka en 1926 (DOBROVLSKII, 1976).

Las salsas parecen ser por lo tanto una manifestación excepcional y relativamente escasa dentro de un complejo de características asociadas típicas de condiciones esteparias y endorreicas: envejecimiento del agua en flujos largos con su progresiva alcalinización y salinización en formación de horizontes alcalinos con depósito de arcilla tipo solonjets (GARCÍA-RODRÍGUEZ *et al.*, 1973) u otras modalidades de suelos hidromorfos, aparición de calvas salinas (salgüeros), ojos, etc., y de una vegetación y flora características. El silencio que se ha mantenido sobre esas curiosas formaciones, en los últimos años, después de un período de referencias abundantes, puede deberse a la ignorancia que ha existido sobre estos mecanismos de formación (y el descrédito del plutonismo, etc., a partir de principios de siglo) y por lo tanto el menor interés para escribir sobre ellas. Pero existe otro factor inquietante que parece tener relación con su rarefacción relacionada con la generalizada disminución de los fenómenos debidos a flujos subterráneos ascendentes en las grandes zonas sedimentarias españolas. Esas circunstancias se traducen, entre otras cosas, en la desaparición constante y progresiva de las lagunas o zonas encharcadizas esteparias. Además de las obras de drenaje o saneamiento del terreno, el problema puede ser el creciente aumento del regadío por medio de pozos, su interferencia con los flujos y descenso de niveles piezométricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNALDEZ, F. G., HERRERA, P., LEVASSOR, C., PECO, B. & SASTRE, A. 1985. Bioindicadores y relaciones hidrogeoquímicas en el acuífero de Madrid. *I Congreso de Geoquímica*. Soria: 41-42.
- BOLÍVAR, I. & CALDERÓN, S. 1900. *Nuevos elementos de Historia Natural*. Madrid.
- CALDERÓN, S. 1888. La sal común y su papel en el

- organismo del globo. *An. Soc. esp. Hist. Nat.*, **17**: 367-434.
- **1891**. Los volcanes de fangosos de Morón. *An. Soc. esp. Hist. Nat.*, **20**: 5-21.
- DOBROVOLSKII, V. V. **1976**. *Geografiya pochv. Prosvishcheniie*. Moscu, **224** pp.
- FAIRBRIDGE, R.H.W. **1968**. *The encyclopedia of geomorphology*. Reinhold Book Corporation. New York.
- FETTER, C. W. **1980**. *Applied Hydrogeology*. Merrill.
- GARCÍA RODRIGUEZ, A., GALLARDO, J. F., MARTÍNEZ CARRASCO, R., SÁNCHEZ CAMAZANO, M., LEDESMA, M. **1973**. Contribución al estudio de los suelos de la depresión del Duero. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **32** (11-12): 991-1.005.
- GEIKIE, A. **1895**. *Geologia. Historia Natural* Muntnaner y Simon. Editores.
- HERNÁNDEZ-PACHECO, F. **1925**. *Geologia fisiográfica*. Instituto Gallach. Barcelona.
- HUCUET DEL VILLAR, E. **1937**. *Los suelos de la península Luso-Ibérica*. Thomas Murby. Londres.
- **1983**. *Geo-edafología*. Publicacions i edicions de la Universitat de Barcelona, **300** pp.
- LLAMAS, M. R. **1987**. El Parque Nacional de Doñana. El medio físico. En *Bases Científicas para la protección de los Humedales de España*. Real Academia de Ciencias de Madrid (en prensa).
- MACPHERSON, V. **1873**. *Bosquejo geológico de la provincia de Cadiz*. Imp. de la Revista Médica. Cádiz.
- MALLADA, L. **1927**. *Explicación del mapa geológico de España*. 2.^a ed. Sucesores de Rivadeneyra, S. A.
- MOLINA, A. **1986**. *Estudio estadístico de la hidrogeoquímica de flujos microlocales en el acuífero detrítico de la cuenca del Tajo*. Tesis de Licenciatura. Fac. Ciencias, Univ. Autónoma de Madrid.
- REYES PROSPER, E. **1915**. *Las estepas de España y su vegetación*. Madrid. **305** pp.
- RUBIO, P. L. & LLAMAS, M. R. **1983**. Contribución al estudio de la relación entre las características hidroquímicas y el sistema de flujo subterráneo en el Terciario detrítico de Madrid. *III Simposio de Hidrogeoquímica, Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. T. IX. Madrid.
- SCHOEDLER, F. **1888**. *Elementos de mineralogía, geognosía y geología*. Imprenta de Francisco Alvarez y C.^o Madrid.
- TOTH, J. **1966**. Mapping and interpretation of field phenomena for ground water reconnaissance in a Prairie environment, Alberta, Canada. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrology*, **9**: 20-68.
- WHITTEN, D. G. A., BROOKS, J. R. V. **1972**. Mud volcano. In: *A dictionary of Geology*. Penguin Books. Middlesex.

AGRADECIMIENTOS

Las observaciones de campo de este trabajo se realizaron con ocasión del proyecto N.º 1.559182, «Aspectos Ecológicos de las Aguas Subterráneas» de la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica.