

MINERALOGIA Y GEOQUIMICA DE LOS SEDIMENTOS DE ALGUNAS LAGUNAS DEL N DE LA PROVINCIA DE MALAGA (S DE ESPAÑA)

F. J. Alcalá-García *, **, A. López-Galindo ***, M. Rodríguez-Rodríguez **** y J. Benavente ****

RESUMEN

Se han observado características composicionales y genéticas similares en los sedimentos más recientes de algunas lagunas del norte de la provincia de Málaga, si bien parecen existir diferencias en su evolución mineralógica y geoquímica y en el grado de alteración del sedimento original. Las alteraciones minerales producidas en estos medios lacustres confinados, con pH superior a 8, están controladas por los intercambios iónicos entre el agua y el sedimento. Según el grado de alteración mineral detectado se han observado tres estadios de evolución mineral para estos sedimentos. Igualmente, se observa una relación entre la evolución mineralógica y geoquímica y las características hidroquímicas del agua existente en el medio. El estudio ha mostrado indicios de neof ormación de minerales ricos en Mg^{+2} .

Palabras clave: mineralogía y geoquímica de arcillas, lagunas, transformación mineral, Subbético Medio.

ABSTRACT

Similar compositional and genetic characteristics for the recently deposited sediments in some lakes and ponds of the north of the Málaga province have been observed. Nevertheless, it seems to exist some differences in their mineralogical and geochemical evolution as well as in the degree of alteration of the original sediment. The mineral alterations produced in these confined lacustrine basins, with pH higher than 8, are controlled by ionic exchange between water and sediment. According to the mineral alteration degree three stadiums of mineral evolution have been detected. In addition the mineralogical and geochemical evolution and the hydrochemical characteristic of the aqueous environment are related. The study has shown that some neof ormation processes of Mg-rich minerals also occur.

Key words: clay mineralogy and geochemistry, lakes, mineral transformation, Middle Subbetic.

Introducción

El área estudiada se sitúa al norte de la provincia de Málaga, entre las localidades de Campillos y Archidona (fig. 1), dentro del dominio Subbético Medio de las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Cruz-Sanjulián, 1974; Peyre, 1974; Comas, 1978). En ella afloran principalmente el complejo alóctono del Trías de Antequera (Peyre, 1874), compuesto esencialmente por materiales arcillosos en facies germánicas, materiales calcáreo-margo-

so jurásicos que conforman los relieves más importantes y materiales neógenos carbonatados detríticos al Sur.

En esta zona se localiza un conjunto de lagunas cuaternarias asociadas a zonas endorreicas desarrolladas sobre materiales arcillosos con yesos del Trías de Antequera (fig. 1). La abundancia de sales y las condiciones climáticas de la zona favorecen la existencia de aguas salobres (Cruz-Sanjulián, 1974), con predominio de dos facies hidroquímicas: clorurada sódica y sulfatada cálcica (tabla 1). La

* IGME. Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España).

** Dpto. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Univ. Politécnica de Cataluña. 08034 Barcelona (España).

*** Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. CSIC-Universidad de Granada. Facultad de Ciencias. 18002 Granada (España).

**** Instituto del Agua. Universidad de Granada. 18071 Granada (España).

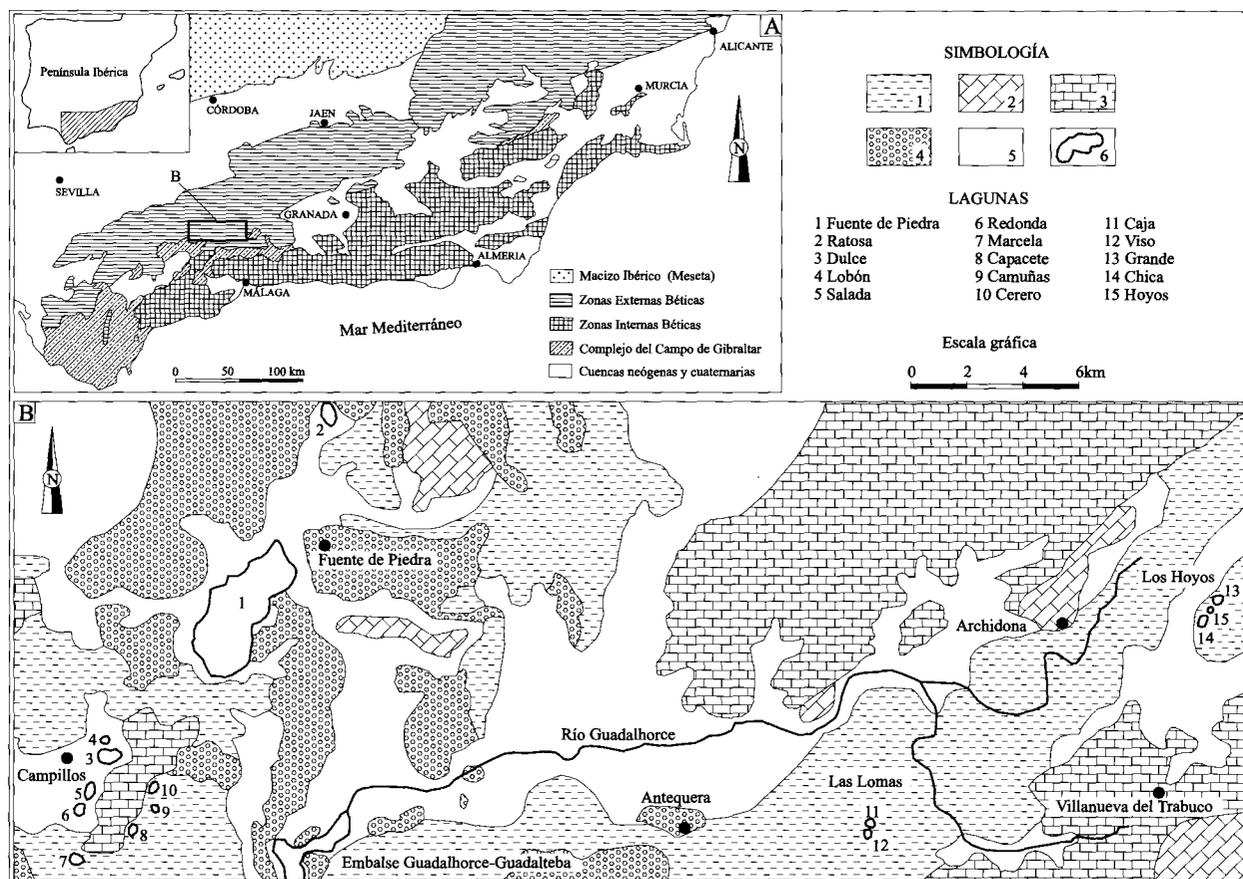


Fig. 1.—A: Localización geográfica y Geología del área de estudio. B: Principales conjuntos de materiales aflorantes. 1: Triás, 2: Jurásico y Cretácico; 3: Paleógeno; 4: Mioceno Superior; 5: Cuaternario y 6: laguna estudiada y número de referencia, modificado de Almécija (1997).

Tabla 1.—Series hidroquímicas obtenidas del estudio analítico de las aguas de las lagunas, según Benavente *et al.* (1986)

Serie Hidroquímica	Laguna
$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$	Ratosa Lobón Salada Cerero Capacete Marcela Fuente de Piedra
$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$	Dulce Camuñas
$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	Grande Chica
$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	Caja Hoyos
$\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	Viso

génesis de estas lagunas está ligada, en la mayoría de los casos, a procesos kársticos de disolución de evaporitas triásicas (Benavente *et al.*, 1986).

Sobre los sedimentos limoso-arcillosos y a veces arenosos de estas lagunas aparecen durante el estiaje películas centimétricas de sal. Cuando se produce la recarga hídrica, el agua de estas lagunas adquiere una concentración salina que favorece el intercambio iónico con los sedimentos. En estas condiciones es posible la transformación química de los minerales originales albergados en los sedimentos y la neoformación de ciertas especies minerales que adoptan una composición química en equilibrio con el medio (Jones, 1986). Castellón (1970) reconoció evidencias de estos procesos en la principal laguna de esta área (Fuente de Piedra).

El objetivo de este trabajo es identificar la naturaleza mineralógica y geoquímica de los sedimentos más recientes de las lagunas y discutir sus posibles

Tabla 2.—Mineralogía total y de arcillas obtenida según poderes reflectantes de Biscaye (1965) y Barahona (1974)

Laguna	Muestra	Mineralogía total								Mineralogía de la fracción < 2 μ					
		Qtz	Cte	Fil	Fd	Dol	Hal	Hem	Illita	Esm	I/S	I/Clh	K	Clh	Pal
Capacete	1	12	5	67	7	6	< 5	< 5	35	12	11	10	< 5	25	< 5
Marcela	2	19	18	51	8	< 5		< 5	43	< 5		< 5	< 5	40	6
Camunas	3	10	27	55	< 5	< 5	< 5	< 5	38	11	< 5	10	< 5	35	< 5
Salada	4	16	10	66	5	< 5		< 5	62	8	8	< 5	< 5	6	10
Dulce	5	18	17	62	< 5				21	41	7	5	12	7	8
Lobón	6	27	20	51		< 5			51	13	14	6	7	< 5	6
Cerero	7	18	56	26					37	25	7	12	< 5	6	13
Fuente Piedra	8	19	30	38	5	8			54	19	8	< 5	< 5	5	13
Fuente Piedra	9	41		59					49	14	< 5	8	< 5	6	16
Viso	10	27		63	10				55	< 5	< 5	6	< 5	14	20
Caja	11	32		68					54	8	9	8	10	11	< 5
Hoyos	12	12	22	55	5	< 5	< 5	< 5	68	< 5		< 5	< 5	16	8
Chica	13	36	19	45					61	8	< 5	10	< 5	8	7
Grande	14	19	37	40		< 5			58	5	5	9	< 5	11	8

áreas fuente, así como caracterizar los procesos de transformación mineral que se están produciendo actualmente en los sedimentos lacustres de estas lagunas saladas. Para ello se han estudiado las propiedades geoquímicas y mineralógicas de los sedimentos de estos sistemas acuosos ligados a un clima mediterráneo con tendencia semiárida (Almécija, 1997).

Metodología

En mayo de 1998 se tomaron 14 muestras de sedimentos superficiales en el borde de trece lagunas (fig. 1). Los resultados analíticos obtenidos en junio de 1998 aparecen en las tablas 2 y 3.

El análisis mineralógico (tabla 2) se ha realizado mediante difracción de rayos X, utilizando un difractor modelo Phillips PW 1710 con rendija automática, radiación CuK y una velocidad de exploración de 2° a 6° por minuto desde 2° 2 θ a 60° 2 θ . Dicho estudio se ha realizado tanto en la muestra total como en la fracción arcilla. Para la cuantificación de las distintas fases minerales se han utilizado los poderes reflectantes de Biscaye (1965) y Barahona (1974). El análisis químico (tabla 3) de los elementos mayores de la fracción arcilla se ha realizado mediante fluorescencia de rayos X, utilizando para ello un equipo modelo Phillips PW 1404.

Descripción mineralógica y geoquímica de las muestras estudiadas

Una vez obtenidos los resultados analíticos, se ha realizado una diferenciación de las muestras en tres clases, según el grado de alteración mineral presentado respecto de una mineralogía inicial típica del Triásico Subbético (Puy, 1979), compuesta por la asociación illita + clorita \pm caolinita \pm dolomita \pm hematites.

Clase 1: Muestras de naturaleza triásica con signos moderados de alteración mineral

Esta clase la definen las muestras 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (lagunas de Capacete, Marcela, Camuñas, Salada, Dulce, Lobón y Cerero), que se sitúan sobre materiales triásicos alterados. Su mineralogía y geoquímica aparecen en la tabla 2 y tabla 3.

Las muestras 1, 2 y 3 presentan una asociación mineral típica del Triásico Subbético (Puy, 1979), en la que destaca la illita y la clorita, con hematites en trazas. La muestra 1 incluye interestratificados I/S y beidellitas magnésicas, junto con altos contenidos de Mg⁺² y Ca⁺² y bajos de Si⁺⁴, Al⁺³ y Na⁺.

Los altos porcentajes de illita y clorita, y la presencia de hematites en trazas y dolomita de las muestras 4, 5, 6 y 7, indica una asociación mineralógica ligada a la alteración de materiales triásicos, y en menor medida, de materiales margosos jurásicos (Palomo-Delgado *et al.*, 1985). El estudio geoquímico de las muestras 4, 5 y 6 ha mostrado valores más bajos de Ca⁺² y Mg⁺² que en la muestra 7, estando los valores de Ca⁺² en relación con la abundancia de esmectita cálcica. Los bajos contenidos de K⁺ y Si⁺⁴, altos de Mg⁺² y Ca⁺² y la aparición de paligorskita muestra un medio rico en bases, aspecto que se correlaciona con el pH superior a 8 de sus aguas.

Clase 2: Muestras con origen triásico e importante alteración mineral

Se trata de las muestras 8 y 9 (tomadas al sur y norte de la laguna de Fuente Piedra) y las muestras 10 y 11 (lagunas de Viso y Caja), todas ellas perte-

Tabla 3.—Geoquímica de los elementos mayores de la fracción arcilla, expresados en porcentajes de óxidos.

Composición química de la fracción < 2 μ expresada en óxidos												
Laguna	Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	C.T.
Capacete	1	41,83	19,68	10,27	0,13	10,28	1,63	0,78	2,03	0,76	0,34	12,06
Marcela	2	39,65	19,46	9,58	0,12	9,7	3,75	0	2,47	0,67	0,35	13,49
Camunas	3	33,74	17,4	7,4	0,1	11,44	9,26	0,05	1,95	0,55	0,29	17,29
Salada	4	50,41	13,73	7,16	0,11	3,02	6,94	0,62	3,22	0,66	0,2	13,04
Dulce	5	45,82	17,74	7,07	0,14	2,08	8,4	0,15	1,96	0,79	0,25	15,78
Lobón	6	44,21	17,7	7,22	0,11	1,85	8,57	0,07	3,11	0,7	0,32	16,05
Cerero	7	29,01	12,55	4,92	0,08	2,73	21,99	0,04	1,83	0,4	0,33	26,98
Fuente Piedra	8	35,65	11,48	4,8	0,06	4,8	15,89	0,37	2,47	0,38	0,17	22,96
Fuente Piedra	9	54,56	20,06	8,19	0,09	2,09	0,85	0,16	3,43	0,77	0,23	10,16
Viso	10	44,12	24,46	8,33	0,1	5,77	0,88	0,12	4,86	0,65	0,21	9,7
Caja	11	44,49	25,84	10,13	0,16	3,37	0,72	0,08	4,32	0,56	0,21	10,57
Hoyos	12	41,87	21,88	7,61	0,07	6,92	2,52	0,06	5,11	0,5	0,41	12,12
Chica	13	44,95	20,62	7,14	0,05	4,73	2,11	0,08	6,29	0,5	0,43	13,92
Grande	14	45,9	22,4	7,91	0,05	5,31	1,34	0,12	6,1	0,54	0,27	9,74

recientes a materiales cuaternarios heredados de triásicos alterados (fig. 1). Su mineralogía y geoquímica aparecen en la tabla 2 y tabla 3.

La mineralogía de las muestras evidencia un origen ligado a una alteración importante del sustrato triásico, como indica su bajo porcentaje de clorita y alto de paligorskita y esmectitas. Los altos contenidos de Ca⁺² y Mg⁺² y bajos de Na⁺ y K⁺ evidencian, además, un enriquecimiento en cationes del medio. En la muestra 9, la ausencia de calcita y la presencia de illita, dolomita y paligorskita indica un grado de alteración mayor, distribuyéndose la mayor parte del contenido de Ca⁺² y Mg⁺² en la formación de esmectitas cálcicas y paligorskita, respectivamente.

Las muestras 10 y 11 presentan una evolución similar, como indica la presencia de paligorskita y los valores moderados de Mg⁺². La escasez de Ca⁺² constituye un factor limitante para la formación de esmectitas, lo que unido a la abundancia en sílice y Mg⁺², puede propiciar, en este caso, la neoformación de paligorskita en un medio con pH superior a 8,5 (Singer y Galán, 1984).

Clase 3: Muestras de naturaleza triásica con signos de alteración mineral intermedios

Se han incluido las muestras 12, 13 y 14 (lagunas de Hoyos, Chica y Grande). Su mineralogía y geoquímica aparecen en la tabla 2 y tabla 3.

La muestra 12 presenta altos porcentajes de illita y clorita, asociación mineral típica de los materiales triásicos subbéticos (Puy, 1979), aunque la existencia de paligorskita en trazas, bajos contenidos de Mg⁺², Ca⁺² y altos de K⁺ evidencian indicios de alteración. De igual forma, las muestras 13 y 14

evidencian ciertos rasgos de alteración, como indica la presencia de interstratificados I/Cl, interstratificados I/S, esmectitas y la aparición de paligorskita en trazas. En la figura 2b se muestra la relación lineal entre los aumentos de Ca⁺² y carbono libre total (C.T.) y la disminución del contenido de Si⁺⁴ para las mismas muestras, lo que debe estar ligado a un aumento del pH que provoca la disolución parcial de cuarzos hipocristalinos del sedimento. Este fenómeno debe facilitar la incorporación de Ca⁺² a las estructuras minerales para la formación de interstratificados. Es necesario añadir que estas tres lagunas son las únicas con agua permanente o semipermanente de las estudiadas en este trabajo, por lo que las reacciones químicas se deben producir de forma continua.

Discusión

Cabe destacar la práctica ausencia de minerales típicos de ambientes salinos confinados (sulfatos o cloruros), ya que todos ellos parecen estar disueltos en las aguas hasta etapas muy tardías de desecación de las lagunas. Igualmente, es notorio el control que parece ejercer el medio hídrico salobre sobre la mineralogía inicial de los sedimentos, transformándola y propiciando la neoformación de algunas fases minerales para su mejor adaptación química al medio.

La aparición de Mg⁺² en estos medios, con valores de pH superiores a 8 y con concentraciones de Si⁺⁴ altas y constantes, favorece la incipiente neoformación de paligorskita a partir de una mineralogía principalmente aluminosilicatada, disolución de cuarzo hipocristalino, aportes hídricos ricos en Ca⁺² y otros cationes, y escasa renovación hídrica (Sin-

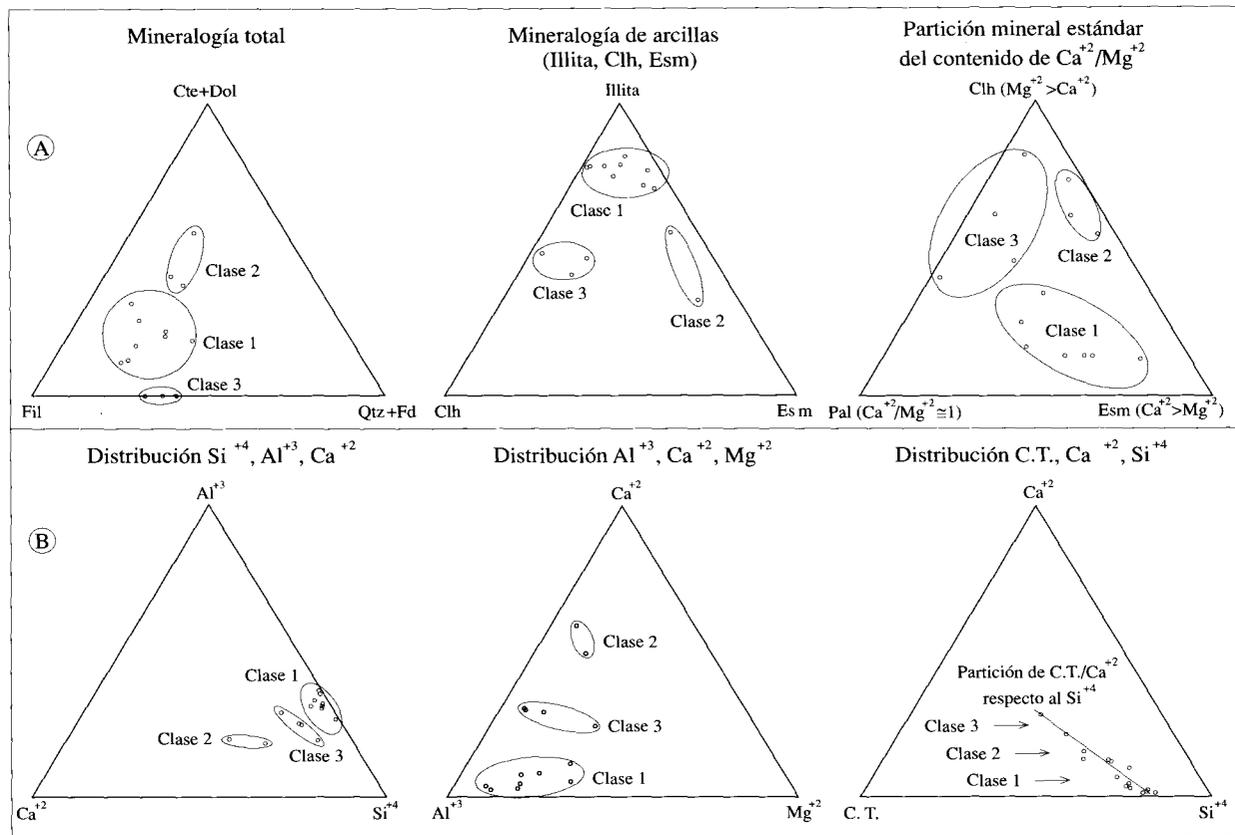


Fig. 2.—A: mineralogía total y de arcillas de las fases minerales características de las muestras estudiadas, y grado de partición $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ en los minerales típicos que lo albergan. B: diagrama de las relaciones geoquímicas $\text{Si}^{+4}-\text{Al}^{+3}-\text{Ca}^{+2}$, $\text{Al}^{+3}-\text{Ca}^{+2}-\text{Mg}^{+2}$ y distribución del carbono libre total (C. T.)- $\text{Ca}^{+2}-\text{Si}^{+4}$ de las muestras estudiadas.

ger, 1979, Jones, 1986; Singer y Galán, 1984). La aparición de paligorskita en los sedimentos de la laguna de Fuente Piedra ya fue advertida por Castellón (1970), que le atribuyó un origen neoformado ligado a las condiciones confinadas de estos medios, ricos en Mg^{+2} y pH superior a 8, según proponen Isphording (1973) y Jones (1986).

El diferente grado de equilibrio químico conseguido por la mineralogía ha permitido distinguir tres clases de evolución mineral, a partir de un sustrato muy similar para todos ellos, principalmente arcilloso calcáreo.

La clase inicial definida se caracteriza por la presencia sistemática de dolomita, clorita e illita (fig. 2a), lo que permite afirmar que su origen está ligado a la transformación incipiente de materiales triásicos (Puy, 1979). Sus características geoquímicas muestran abundancia de Mg^{+2} y escasez de Ca^{+2} , lo que evidencia un grado de evolución bajo y

desigual a partir de los minerales triásicos originales ricos en Mg^{+2} (fig. 2b).

La segunda clase presenta una mineralogía que deriva de materiales triásicos muy alterados (Puy, 1979) y jurásicos subbéticos (Palomo *et al.*, 1985). Se ha detectado abundante Ca^{+2} en la fracción arcilla, altos porcentajes de carbono libre total (C. T.) y escasez de Mg^{+2} (fig. 2a y fig. 2b). Esta clase presenta bajos contenidos de clorita y altos de interstratificados e illita, lo que permite afirmar que se trata de un sedimento triásico con alto grado de alteración.

La tercera clase presenta altos porcentajes de calcita, dolomita y esmectitas cálcicas, lo que permite afirmar que existe cierta incorporación de sedimentos provenientes de la erosión de materiales jurásicos y terciarios margoso-calcáreos (Palomo-Delgado *et al.*, 1985; Alcalá-García *et al.*, 1998). La mineralogía de las arcillas presenta altos contenidos

de esmectitas cálcicas y práctica ausencia de clorita (fig. 2a), mientras que la geoquímica muestra abundancia de Ca^{+2} , aspecto relacionado con las facies hidroquímicas encontradas (tabla 1).

Conclusiones

El estudio mineralógico y geoquímico ha mostrado que los minerales ricos en Mg^{+2} (clorita y dolomita), abundantes en los sustratos triásicos de las lagunas estudiadas, tienden a alterarse, evolucionando hacia una pérdida gradual de Mg^{+2} que favorece la aparición de nuevas fases minerales estables en medios ricos en Ca^{+2} y pH superior a 8. En estas condiciones se favorece la capacidad de disolución de cuarzos hipocristalinos y la pérdida de Al^{+3} y Si^{+4} de la illita y la clorita, propiciando la aparición de esmectitas cálcicas (beidellitas) y la neoformación de paligorskita (Singer, 1979).

La inexistencia de acúmulos de sales (cloruros y sulfatos) en los sedimentos de estas lagunas en el momento del muestreo y las evidencias de que el ambiente sedimentario es propicio para su formación (como, de hecho, se constata en muchas de ellas durante los períodos de estiaje), permite pensar que esta mineralogía puede estar sirviendo como regulador de bases (Ca^{+2} principalmente) en las aguas de las lagunas en un porcentaje bajo y difícil de estimar. Este factor se une a la capacidad de disolución de Si^{+4} y al grado de sustitución de Al^{+3} (dioctaédrico) por Ca^{+2} y Mg^{+2} (trioctaédrico) de las estructuras minerales (Singer y Galán, 1984). Las arcillas entrarían a formar parte del grupo de radicales aniónicos, junto a CO_3^{-2} , SO_4^{-2} y Cl^- , en la captación de cationes durante las primeras fases de desecación de las lagunas, principalmente en aquéllas con un régimen hídrico permanente o semipermanente.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. M. Rendón, director-conservador de la Reserva Natural laguna de Fuente de Piedra y lagunas de Campillos, por su colaboración. Este estudio ha estado parcialmente financiado a cargo del proyecto «Caracterización Ambiental de las zonas húmedas de la provincia de Málaga y su inclusión en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía (SINAMBA)» subvencionado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, al proyecto de la CICYT HID 99-0205 (Sicoam 2046) y a los Grupos de Investigación RNM-189 y 179 de la Junta de Andalucía. Se agradece al Prof. Javier Cruz San Julián la lectura del manuscrito original y las sugerencias al mismo.

Referencias

- Alcalá-García, F. J., López-Galindo, A. y Martín-Martín, M. (1998). Mineralogía del Terciario de la Alta Cadena (NE de la provincia de Málaga: S de España). Implicaciones paleogeográficas y sedimentológicas. *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 21: 163-175.
- Almécija, C. (1997). *Estudio hidrológico de los enclaves lagunares del norte de la provincia de Málaga*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada 518 págs. (inédita).
- Barahona, E. (1974). *Arcillas de ladrillería de la provincia de Granada: evaluación de algunos ensayos de materias primas*. Tesis Doctoral. Univ. Granada, 398 págs.
- Benavente, J., Almécija, C. y Carrasco, F. (1986). Origin and environmental significance of saline waters in the Antequera region (southern Spain). En: *Wetlands: a multiapproach perspective*. (J. J. Cruz San Julián y J. Benavente, ed.). Univ. de Granada, 55-68.
- Biscaye, P. E. (1965). Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 76: 803-832.
- Castellón, L. (1970). *Sobre la sedimentación en la laguna salada de Fuente-Piedra (Málaga)*. Tesis de licenciatura. Univ. de Granada 79 págs. (inédita).
- Comas, M. C. (1978). *Sobre la geología de los Montes Orientales: sedimentación y evolución paleogeográfica desde el Jurásico hasta el Mioceno inferior*. Tesis Doctoral, Univ. de Bilbao, 323 págs.
- Cruz-San Julián, J. (1974). *Estudio geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 413 págs.
- Ispording, W. C. (1973). Discussion of the occurrence and origin of sedimentary palygorskite-sepiolite deposits. *Clays and Clay Minerals*, 21: 391-401.
- Jones, B. F. (1986). Clay mineral diagenesis in lacustrine sediments. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, 1578: 291-300.
- Palomo-Delgado, I., Ortega-Huertas, M. y Fenoll-Hach-Alí, P. (1985). The influence of clay minerals in studies of the evolution of the Jurassic deposits of the betic Cordillera, SE Spain. *Clay Minerals*, 20: 39-52.
- Peyre, Y. (1974). *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères Bétiques, Espagne)*. Tesis Doctoral, Univ. de París, Inst. Nat. Agronomique, 528 págs.
- Puy, J. L. (1979). *Mineralogía y geoquímica del Triás de la Zona Subbética de Huelma (Jaén)*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 336 págs.
- Singer, A. (1979). Palygorskite in sediments: Detrital, diagenetic or neofomed. A critical review. *Geol. Rundschau*, 68: 996-1008.
- Singer A. y Galán, E. (1984). Paligorskite-sepiolite. Occurrences, genesis and uses. En: *Development in sedimentology*. Elsevier-Amsterdam, 37, 473 págs.

Recibido el 26 de febrero de 2001.
Aceptado el 17 de septiembre de 2001.