

El registro sedimentario lacustre del *maar* de Fuentillejo (Ciudad Real)

J. Vegas⁽¹⁾, A. García-Cortés⁽¹⁾, L. Galán de Frutos⁽²⁾, A. Pérez-González⁽³⁾ y A. Martín-Serrano⁽²⁾

(1) Recursos Minerales y Geoambiente. Instituto Geológico y Minero de España.
Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. Telf. +34 918032200 Fax. +34918036200
E-mails: j.vegas@igme.es - garcia.cortes@igme.es

(2) Geología y Geofísica. Instituto Geológico y Minero de España.
La Calera, 1. 28076 Tres Cantos (Madrid). Telf. +34 91 7286162
E-mails: l.galan@igme.es - a.martinserrano@igme.es

(3) Dpto. Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
José Antonio Novais. 28040 Madrid. Telf. +34 913944890 Fax. +34 913944895
E-mail: alfredog@geo.ucm.es

RESUMEN

La laguna del *maar* de Fuentillejo ha registrado múltiples fases de sedimentación detrítica, carbonática, sapropélica, evaporítica y orgánica, como muestra el sondeo de 142,25 m realizado en el centro del *maar*. Se han identificado 23 unidades sedimentarias, que reflejan los aportes variables de detríticos, la química de las aguas y los componentes orgánicos a lo largo de la historia del lago. Hay seis tipos básicos de facies lacustres: 1) capas detríticas gradadas, que indican episodios erosivos en la cuenca de drenaje; 2) ritmitas detríticas, típicas de una sedimentación de ambiente profundo con aportes extracuencales; 3) ritmitas orgánico-carbonáticas de ambiente profundo con una elevada productividad; 4) evaporitas desarrolladas en un medio de elevada salinidad en ambiente semiárido de un lago efímero; 5) sapropeles, depositados durante periodos caracterizados por una elevada productividad y preservación en ambiente anóxico; 6) margas y limos masivos con estructuras de bioturbación correspondientes a un ambiente lacustre somero, con episodios de desecación.

Palabras clave: Ciudad Real, cuenca cerrada, lago, *Maar*, registro sedimentario

The lacustrine sedimentary record of the Fuentillejo Maar (Ciudad Real, Spain)

ABSTRACT

The Fuentillejo maar lake in Ciudad Real province, records multiple phases of clastic, sapropelic, carbonatic, organic and evaporite dominated deposition, as revealed from a 142,25 m deep core drilled in the center of the maar. 23 major lithostratigraphic units have been identified, pointing out variations in clastic input, water chemistry and organic fraction throughout the history of the lake. There are 6 main sedimentary facies: 1) clastic graded beds indicative of erosive events on the catchment; 2) clastic rhythmites on a deep lake with frequent detrital inputs; 3) organic-carbonate rhythmites typical of higher organic productivity; 4) evaporites of an ephemeral lake in a semi-arid environment; 5) sapropels developed along periods of high productivity and high preservation of organic matter over anoxic lake floor; 6) bioturbated massive micrites and silts with desiccation events on a fluctuating lake level.

Key words: Ciudad Real, closed-basin, lake, Maar, sedimentary record

Introducción

Los lagos en *maares* son una fuente importante de archivos naturales y constituyen un ejemplo interesante para el estudio de las variaciones sedimentarias, relacionadas con los cambios paleoclimáticos. La morfología y la profundidad de este tipo de lagos favorecen la acumulación rápida y de forma continuada de sedimentos, con la suficiente resolución para el estudio de los periodos temporales involucra-

dos. La mayor ventaja que nos ofrecen estos registros es su alta resolución temporal, preservando una detallada información de los cambios en los patrones de la sedimentación, como resultado de la imposición de factores climáticos, volcánicos y antrópicos (ELDP 'European Lake Drilling Programme', 1997; Colman, 1995).

El objetivo de este trabajo es describir el registro sedimentario de lago del *maar* de Fuentillejo, contribuyendo al estudio preliminar de este tipo de lagos,

con la finalidad de interpretar cuáles fueron los condicionantes paleoambientales y paleoclimáticos que controlaron la sedimentación en esta cuenca lacustre cerrada.

Situación geográfica y geológica

La zona de estudio se localiza en la Región Volcánica Central de España, en el centro de la provincia de Ciudad Real (Comunidad de Castilla-La Mancha). El volcanismo de Campo de Calatrava se desarrolla, al menos, en dos fases (Ancochea, 1983; Bonadonna y Villa, 1984). La primera de ellas tiene carácter ultrapotásico, ocupa el centro de la región volcánica y tiene una cronología que se sitúa entre 8,7 y 6,4 Ma. La segunda fase desarrolla un volcanismo alcalino y ultraalcalino, con un episodio de actividad principal entre 4,7 y 1,75 Ma. Posteriormente hay cierta actividad volcánica en el Pleistoceno inferior, de acuerdo con los datos radiométricos que aportan edades de 1,3 Ma, junto con los datos magnetoestratigráficos, que amplían notablemente el período de actividad volcánica en la región, hasta los 0,7 Ma (Gallardo-Millán *et al.*, 1998, 2002; Gallardo-Millán y Pérez-González, 2000; Gallardo-Millán, 2004).

Una de las manifestaciones volcánicas de la región son los cráteres de explosión originados mediante procesos eruptivos hidromagmáticos, denominados *maeres*, que albergan las lagunas del Campo de Calatrava (Portero *et al.*, 1988; Poblete, 1995; González-Cárdenas *et al.*, 2002). El término '*maar*' (además de definir un rasgo morfológico, comprende la estructura total y su formación) reúne la pared o anillo que rodea el cráter, los sedimentos que rellenan el cráter, la diatrema y el sistema de diques de alimentación (Büchel, 1993).

La laguna de Fuentillejo, también denominada La Posadilla, está localizada al sur del municipio de Valverde de Calatrava, a una altitud de 638 m s.n.m. y ocupa el fondo del cráter del *maar* (Fig. 1). Este entorno ha sido declarado "Monumento Natural de la Laguna y Volcán de La Posadilla" (Decreto 207/1999). Por su situación geográfica puede clasificarse como una 'laguna de sierra', debido a su localización en las serranías paleozoicas (Ancochea, 1983; Poblete, 1993; González-Cárdenas *et al.*, 2002). El episodio explosivo freatomagmático que originó el *maar* de Fuentillejo tuvo lugar entre pizarras y cuarcitas del Ordovícico Inferior de la Sierra de Medias Lunas, formándose un cráter de morfología irregular y dió lugar a una oleada piroclástica de unos 4 km de longitud, que se apoya en inconformidad sobre los materiales paleozoicos y pliocenos de la región (Fig. 1). El *maar* tiene unas dimensiones de 450x250 metros de diámetro

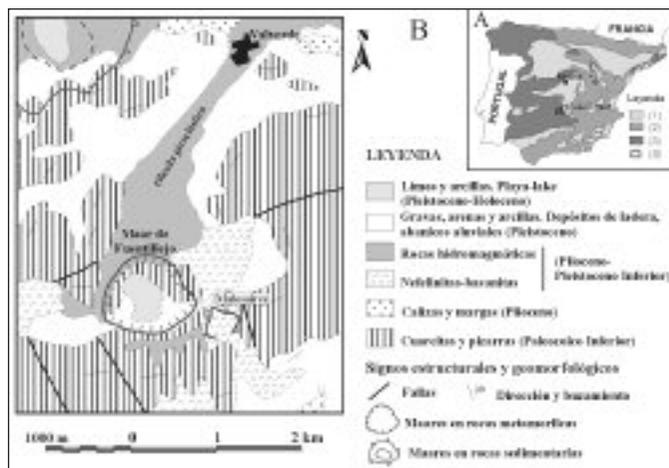


Fig. 1. **A.** Mapa de situación en la Península Ibérica: (1) Cuencas neógenas. (2) Cordilleras Alpinas. (3) Macizo Paleozoico. (4) Zona de estudio en la región de Campo de Calatrava. **B.** Mapa geológico de los alrededores del *maar* de Fuentillejo, provincia de Ciudad Real (Simplificado de Portero *et al.*, 1988)

Fig. 1. **A.** Situation map of the study area into the Iberian Peninsula: (1) Neogene basins. (2) Alpine mountain range. (3) Palaeozoic massifs. (4) Campo de Calatrava study site. **B.** Geological map of the Fuentillejo maar, Ciudad Real province (simplified from Portero *et al.*, 1988)

interno y 1.400x1.400 metros de diámetro externo. Al norte está rodeado por un anillo de tobas, con una diferencia de altura de 40 m, mientras que el lado sur está limitado por una pared de cuarcitas de más de 120 m de altura.

Desde su origen, la cuenca lacustre ha sido un sistema cerrado, con tres abanicos aluviales principales (Fig. 2) que han aportado material detrítico (cuarcitas, basaltos, basanitas, nefelinitas y fragmentos piroclásticos). La laguna que existe actualmente es de carácter temporal, tiene un perímetro de 2.513 metros, una superficie de 12,15 hectáreas y sus aguas son hiposalinas, con un pH entre 9,7-9,9 y una conductividad entre 3,40-4,68 mS/cm (González-Cárdenas *et al.*, 2002).

Metodología

Se realizó un sondeo (Fuentillejo-1, FU-1) de 142,4 m, con recuperación continua de testigo, mediante una máquina de perforación modelo Craelius D-900. La perforación concluyó cuando se alcanzaron las cuarcitas ordovícicas del diatrema (Pérez González *et al.*, 2003; Vegas *et al.*, 2004b). Las coordenadas de dicho punto son 38° 56' 22" - 4° 3' 13", que corresponden a la parte central de la laguna, donde el espesor de sedimentos se presumía mayor, de acuerdo con los estudios geofísicos previos (Granda *et al.*, 2000). Esta

sucesión estratigráfica representa un excepcional y bien preservado registro sedimentario en una cubeta lacustre cerrada.

Los testigos se colocaron en cajas portatestigos (64x44x8 cm) y se envolvieron en un plástico de color negro, con el fin de evitar pérdidas de humedad y alteración por exposición a la luz. Durante los trabajos de campo se realizaron las primeras descripciones macroscópicas y la toma de fotografías de los testigos. De este modo, se identificaron las principales facies sedimentarias, a partir de las cuales se reconstruyó la columna estratigráfica preliminar.

Los testigos se conservan en una cámara frigorífica a una temperatura constante de 4° C, sin humedad y preservados de la luz solar, para mantener intactas, en la medida de lo posible, las propiedades físico-químicas de los sedimentos. La división longitudinal de los testigos se ha realizado con una guillotina de corte electro-osmótico (Vegas *et al.*, 2004a), de manera que se minimizan su contaminación y distorsión. Se han fotografiado las superficies expuestas de los testigos inmediatamente después de su apertura para evitar, sobre todo, cambios de coloración en los sedimentos.

Cronología

Poblete (1993) reconoce varias fases eruptivas en el entorno de Fuentillejo, indicando su relación temporal relativa, aunque no aporta datos geocronológicos exactos para cada una de ellas. Según este autor, la primera corresponde con una actividad volcánica efusiva, cuyo cráter se reconoce en la cima de Malosaires, con la emisión de varias coladas lávicas. En la actualidad, se han conservado aquellas que discurrieron preferentemente por la ladera sur con dirección al valle del Guadiana, pero también se han identificado restos cerca de la cima, con dirección de avance norte sobre la ladera este del *maar* (Fig. 1).

Se han realizado dos dataciones radiométricas (métodos K-Ar y Ar-Ar) en dos muestras de basalto (bombas) de la ladera este del *maar*, que señalan una edad aproximada entre 6,4 y 5,2 Ma (Tabla 1). Este intervalo de edad quedaría enmarcado hacia el final de la primera fase del volcanismo de Campo de Calatrava.

La siguiente fase eruptiva (Poblete, 1993) corresponde con una erupción hidromagmática, que originó la estructura del *maar* y destruyó, en parte, el edificio anterior (Hernández-Pacheco, 1932). Esta erupción está asociada a la fractura de desgarre de componente E-O que atraviesa la sierra, a la que se asocian otras fracturas transversales de dirección NO-SE. Esta fracturación de la sierra favoreció la formación de pequeños acuíferos que interaccionaron con el magma (Ancochea, 1983). Durante la erupción se emitió una oleada piroclástica que discurrió hacia el norte por el valle de Valverde, hasta llegar al Guadiana. Por el momento, aún no se han realizado dataciones radiométricas que sitúen temporalmente este episodio freatomagmático, aunque también se podría situar la posición cronoestratigráfica relativa de dicha oleada. Sus relaciones con el registro sedimentario de la cuenca de Alcolea y con las terrazas del río Guadiana, actualmente en estudio, puede ser suficiente ya que se dispone de referencias paleontológicas muy próximas, tales como los yacimientos de Valverde I y II (Hernández-Pacheco, 1921; Bonadonna y Villa, 1984; Alberdi *et al.*, 1987; Gallardo-Millán, 2004). A partir de este momento tendría lugar el comienzo de la sedimentación en la laguna, con posterioridad al momento de la emisión piroclástica.

En el sondeo FU-1 se han realizado 6 dataciones por radiocarbono mediante AMS, repartidas en los 19 primeros metros (Tabla 2). La figura 3 muestra el modelo edad-profundidad para las muestras analizadas, siendo la edad más antigua obtenida de 42.620 años C¹⁴ BP, para una profundidad de 18,4 m.

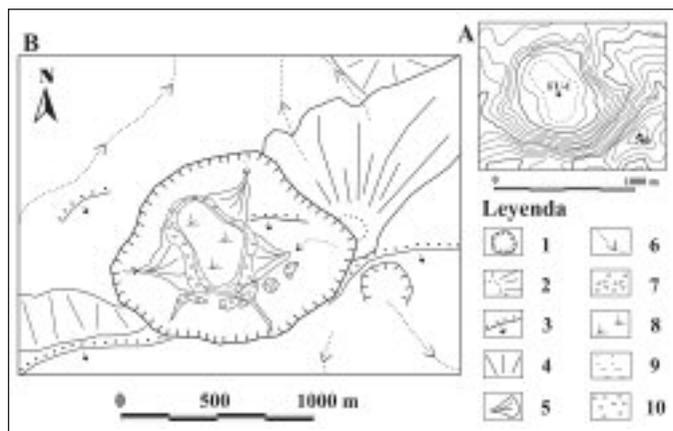


Fig. 2. **A.** Mapa topográfico de la zona (equidistancia entre curvas de nivel: 10 metros). El punto FU-1 es la posición del sondeo objeto de estudio. **B.** Esquema geomorfológico del *maar* de Fuentillejo. Leyenda: (1) Cráter de explosión. (2) Cono volcánico degradado. (3), Resalte en cuarcitas y dirección de inclinación de la capa. (4) Coluviones. (5) Abanicos aluviales-abanicos deltaicos. (6) Arroyos con o sin cauces definidos. (7) Canchales no vegetados. (8) Fondo endorreico estacional. (9) Zona litoral lacustre. (10) Zonal litoral lacustre con vegetación de matorral y herbácea

Fig. 2. **A.** Topographic map of the study area (10 meters between contour lines). **B.** Geomorphological map. Legend: (1) Explosion crater. (2) Eroded volcanic cone. (3) Scarp in quartzite and direction of dip. (4) Colluvial deposits. (5) Alluvial fans-fan deltas. (6) Streams with or without defined channels. (7) Non vegetated scree lobes. (8) Lacustrine mud flat. (9) Lake shoreline. (10) Lake shoreline with herbs and scrubs

Muestra	Método	Tipo de muestra	Localización	Edad - Ma	% ⁴⁰ Ar _{air}	Ar ⁴⁰ /Ar ³⁶
FU-VR-4	K-Ar*	Basalto. Roca total	Ladera norte de la cima de Malos aires	6.5 ± 0.4	81.4	-
				6.4 ± 0.4	82.3	-
YK-246	Ar-Ar	Basalto. Roca total	Bomba anillo piroclástico norte. Obtenida calicata a 2,70 m prof.	5,2 ± 0,8	-	331 ± 4

Tabla 1. Edades radiométricas de las bombas de la erupción de volcán de Malosaires. Las determinaciones se han realizado en el laboratorio de Geochronology and Isotopic Geochemistry de ActLabs en Canadá. *, Esta muestra se dividió en dos y se realizaron dos dataciones por separado, para asegurar la fiabilidad del resultado

Table 1. Radiometric ages of two bombs from the Malosaires volcano. Analysis were made in the Geochronology and Isotopic Geochemistry Lab (ActLabs Inc.), Canada. *, This sample was split in halves and radiometric determinations were made separately on each one

Prof. (m)	Laboratorio	Anal.	Edad ¹⁴ C años B.P.	Edad Cal B.P.*	Mediana Cal B.P.	¹³ C/ ¹² C
0,65	Beta-204449	AMS	1.570 ± 40	1.540-1360	1.450	-22,7
4,35	Beta-204450	AMS	15.420 ± 70	18.880-18.000	18.440	-24,1
6,75	Beta-190136	AMS	16.540 ± 90	20.240-19.210	19.725	-24,3
14,45	Beta-190139	AMS	25.470 ± 210**	-	-	-24,6
16,91	Beta-190140	AMS	30.880 ± 360**	-	-	-20,3
18,40	Beta-177581	AMS	42.620 ± 1.490**	-	-	-22,2

Tabla 2. Dataciones de radiocarbono realizadas para el sondeo FU-1 del maar de Fuentillejo (Ciudad Real). *, Edad calibrada B.P. 2 sigma al 95% de probabilidad, INTCAL98 (Stuiver *et al.*, 1998). **, Edades calibradas B.P. 2 sigma al 95% de probabilidad, con el programa CalPal, versión Mayo 2005 (Cologne Radiocarbon Calibration Palaeoclimate Research Package, www.calpal.de)

Table 2. Radiocarbon ages of the maar de Fuentillejo core FU-1 sediments (Ciudad Real). All ages were measured from the organic fraction of core sediments. *, Calibration ages are 2 sigma 95% probability, INTCAL98 (Stuiver *et al.*, 1998). **, Age calibration was made with the CalPal software, version May 2005, by 2 sigma 95% probability (Cologne Radiocarbon Calibration Palaeoclimate Research Package, www.calpal.de)

Unidades sedimentarias

El registro sedimentario del maar de Fuentillejo se ha dividido en 23 unidades sedimentarias (Fig. 4), de acuerdo a los esquemas de descripción y clasificación de Schnurrenberger *et al.* (2001, 2003), que está basado en la descripción de los rasgos macroscópicos y en el estudio microscópico de los componentes sedimentarios, para su uso en sedimentos lacustres. Este sistema de clasificación ha sido especialmente diseñado para la descripción de sondeos y emplea un esquema similar al que se utiliza en la descripción de sondeos del *Ocean Drilling Program*, que propone: i) Ofrecer una idea general de la variabilidad composicional del material del sondeo, que de manera indirecta tiene una aplicación para la interpretación paleolimnológica. ii) Definir la composición sedimentaria de las unidades mayores, las cuales servirán de ayuda a los colaboradores del proyecto (en función de los objetivos) para la elección de los estudios especializados que deben realizarse. iii) Reconocer las discontinuidades sedimentarias y las estructuras que puedan originar datos erróneos en los estudios de detalle y que deben guiar la estrategia del muestreo. Posteriormente, se aplicarán los principios lim-

nogeológicos para definir las facies y subfacies, así como las interpretaciones de los ambientes sedimentarios para cada unidad. A continuación se describen las unidades de base a techo:

Unidad 1: 142,25 a 138,40 m

Se apoya en discordancia sobre el substrato de cuarcitas paleozoicas fragmentadas que forman parte del diatrema y es la unidad inferior del registro. Está formada por capas centimétricas a decimétricas de color gris, con arenas medias y gruesas sin consolidar, formadas por fragmentos de roca volcánicos (Rv: basalto), cuarzo y, en menor proporción, fragmentos metamórficos (Rm: cuarcita), en una matriz limosa arcillosa. La arena está cementada en los primeros 15 cm de la base de la unidad. Las capas muestran en la base una estructura gradada, tanto normal como inversa. Entre las capas de arena hay intercaladas láminas milimétricas de limo de color gris y limo orgánico de color negro. A una profundidad de 140,40 m, dichas láminas presentan deformación sinsedimentaria, por sobrecarga relacionada con las capas de arenas suprayacentes.

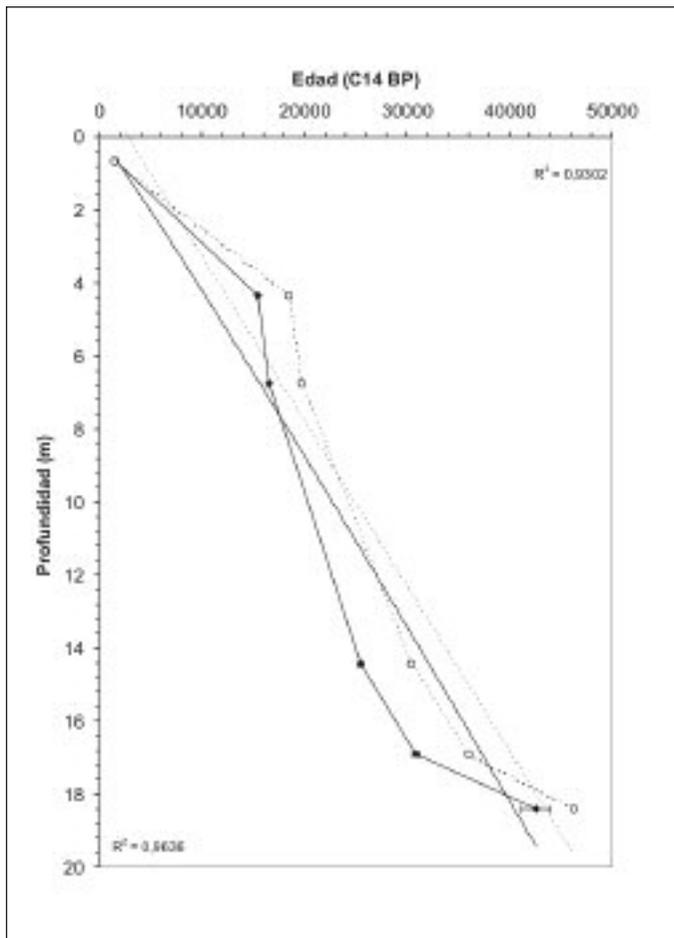


Fig. 3. Modelo edad-profundidad a partir de 6 edades de radiocarbono del sondeo FU-1. Los rombros negros representan las edades de radiocarbono convencionales, con su intervalo de error. Los círculos blancos corresponden a las edades calibradas
 Fig. 3. Age-depth model based on 6 radiocarbon dates of core FU-1. The black diamonds represent the measurements of conventional radiocarbon (absolute error). Calibrated ages are shown by open circles

Unidad 2: 138,40 a 133,70 m

Láminas milimétricas sin consolidar de color gris, formadas por limo y arcilla de composición mayoritaria siliciclástica. Debido al pequeño espesor de las láminas no se distinguen estructuras significativas, salvo una laminación paralela. Intercaladas en las láminas se distinguen capas centimétricas de arenas de color gris, de cuarzo y Rv con matriz limosa, que en conjunto muestran una gradación normal (Fig. 5A). En el intervalo de profundidad entre 135,65 y 135,78 m las láminas están ligeramente distorsionadas, por procesos de resuspensión y/o por escape de fluidos, probablemente, como consecuencia de la sedimentación de una capa de arena suprayacente.

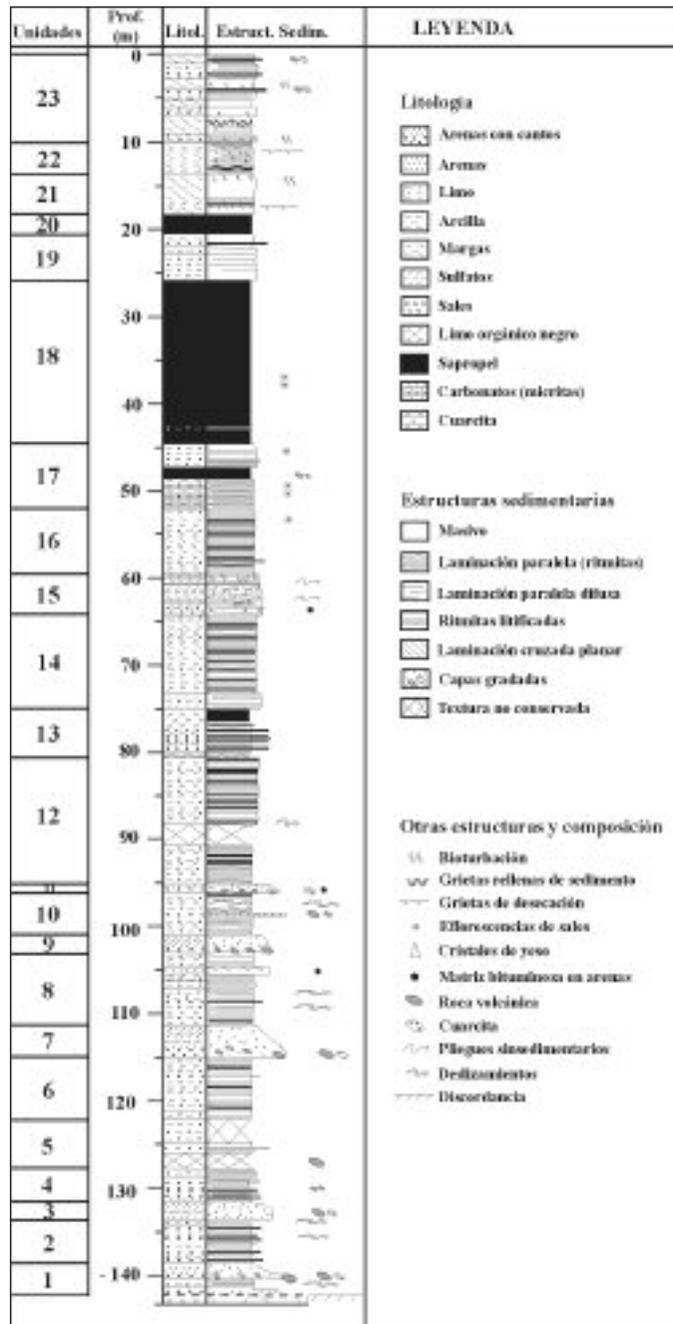


Fig. 4. Columna estratigráfica simplificada y principales unidades sedimentarias diferenciadas en el registro del maar de Fuentillejo, a partir de los datos del sondeo FU-1 (142,40 m)
 Fig. 4. Simplified stratigraphic log and main sedimentary units distinguished in the Fuentillejo maar lacustrine record (core FU-1, 142.40 m)

Unidad 3: 133,70 a 131,80 m

Es una única capa de 1,90 m de espesor, con coloración gris oscuro, de arena media y gruesa sin consolidar, con cuarzo, fragmentos de roca Rv y Rm, casi

sin matriz. La base es neta y muestra una gradación normal y en el contacto con la unidad infrayacente (unos 3 cm) las láminas están deformadas, probablemente, por el efecto de carga que supone la sedimentación de esta capa de granulometría gruesa. No se conserva del todo la textura original debido a su baja consolidación, circunstancia que dificultó las operaciones de perforación y recuperación.

Unidad 4: 131,80 a 128,90 m

Se trata de láminas milimétricas de limos y arcillas de color gris y, en menor proporción, láminas carbonáticas de color crema. Intercaladas entre estas laminaciones aparecen frecuentes capas centimétricas-decimétricas de color gris claro, de arenas finas y muy finas sin consolidar de cuarzo, Rv y Rm, en una matriz limoso-arcillosa, con gradación normal. El contacto de la base es neto y suele contener gravas angulosas de Rv.

Unidad 5: 128,90 a 121,00 m

Consiste en una alternancia de capas centimétricas y láminas milimétricas de color gris y crema, formadas por limo arenoso y arena muy fina de cuarzo y Rv que, en ocasiones, engloban cantos de varios centímetros de Rv (Fig. 5A). La textura no se conserva en su totalidad debido a las operaciones de perforación.

Unidad 6: 121,00 a 115,10 m

Se caracteriza por la presencia de láminas milimétricas a submilimétricas sin consolidar, de colores negro, crema y verde oliva, formadas por la alternancia rítmica de limo sapropélico, sedimento carbonático micrítico y materia orgánica.

Unidad 7: 115,10 a 111,25 m

Es una capa de color gris, de características similares a las de la unidad 3, de unos 4 m de espesor. Está compuesta por arena gruesa, media y fina de cuarzo, Rv y Rm, en una matriz limoso-arcillosa. Englobados en las arenas aparecen clastos de rocas volcánicas y, en menor proporción, de cuarcita de varios centímetros de diámetro. El contacto de la base es neto, aparentemente erosivo. Presenta una gradación normal.

Unidad 8: 111,25 a 103,05 m

Consiste en capas centimétricas y láminas milimétricas de color negro formadas por limos sapropélicos, que se intercalan rítmicamente con láminas micríticas de color marrón y ocre. En menor proporción se identifican láminas de limos de composición detrítica y capas centimétricas gris oscuro, de arenas cuarcíticas con matriz bituminosa y estratificación cruzada. En varias ocasiones, las laminaciones están distorsionadas y podrían interpretarse como estructuras de *slump*, debidas a deslizamientos gravitacionales de los márgenes del lago.

Unidad 9: 103,05 a 101,90 m

Es un nivel compuesto por capas de espesor decimétrico, de color gris, similar a las descritas en las unidades 1, 3 y 7, formada por arena gruesa, media y fina sin consolidar, de composición siliciclástica, con cuarzo, Rv y Rm, en una matriz limoso-arcillosa. La base de este depósito contiene clastos volcánicos de varios centímetros de diámetro. En su conjunto la capa muestra una tendencia granodecreciente. La textura original no se conserva y se ha modificado debido a las operaciones de perforación.

Unidad 10: 101,90 a 95,80 m

Está compuesta por láminas milimétricas de color negro, formadas por sedimento orgánico de tipo sapropel, que se intercalan rítmicamente con láminas micríticas de color marrón, verde oliva y ocre (Fig. 5B). Hacia la mitad de esta unidad (entre 100,05 y 98,15 m) hay una capa centimétrica de color gris oscuro de arena cuarzosa con cantos volcánicos. En el intervalo de profundidad entre 97,55 y 96,96 m se identifican varios niveles donde la laminación aparece ligeramente deformada y plegada por procesos de resuspensión y/o por deslizamientos subacuados. Debido a estos procesos la base de este intervalo es ligeramente erosivo.

Unidad 11: 95,80 a 95,00 m

Está constituida por capas de espesor centimétrico a decimétrico de color gris oscuro de arena media sin cementar, cuarcítica y con clastos de Rv de varios centímetros de diámetro, englobados en una matriz limosa. Además, contiene restos de materia orgánica bituminosa. La base es plana y el contacto neto, exhi-

biendo gradación normal. Se trata de un episodio de sedimentación detrítica grosera, similar a los descritos en las unidades 1, 3, 7 y 9.

Unidad 12: 95,00 a 80,05 m

Consiste en láminas milimétricas de color negro formadas por limo sapropélico que se intercalan rítmicamente con otras láminas de color verde oliva margoso-arcillosas con materia orgánica. Lo más significativo de esta unidad es que, intercaladas con las anteriores, hay láminas micríticas de color ocre que están consolidadas por cementación. Entre las láminas se han podido distinguir restos fibrosos vegetales carbonizados. Hacia la mitad de este tramo hay 2,10 m con recuperación parcial de testigo. A una profundidad de 88,15 m hay un nivel de unos 7 cm donde la laminación está plegada y deformada, probablemente por procesos de deslizamientos subacuosos. La sedimentación continúa hacia el techo de la unidad con las mismas características descritas para el nivel inferior.

Unidad 13: 80,05 a 73,50 m

Se trata de capas centimétricas y láminas milimétricas de color negro, ricas en materia orgánica, formadas por sedimentos sapropélicos. Intercaladas en ellas aparecen capas centimétricas de color gris oscuro de arena media y fina, sin consolidar, fundamentalmente de cuarzo, con matriz limoso-arcillosa. A techo de esta unidad hay una capa decimétrica masiva de sapropel, con materia orgánica amorfa.

Unidad 14: 73,50 a 64,40 m

Predominan las láminas milimétricas micríticas de color crema, que alternan con láminas de limo orgánico de color marrón. Hacia el techo aparecen con mayor frecuencia láminas de color blanco lechoso con yeso.

Unidad 15: 64,40 a 59,70 m

Esta unidad está formada mayoritariamente por sedimentos evaporíticos (Fig. 5C), y pueden diferenciarse tres tramos: 1) La base son láminas milimétricas de arenas muy finas de cuarzo, embebidas en una matriz bituminosa, que alternan con capas centimétricas de

origen evaporítico (fundamentalmente yeso) y carbonato; 2) La parte central de la unidad es la más representativa y está formada por la alternancia de capas de sulfato y de carbonato: i) capas centimétricas de color gris con cristales de yeso selenítico y una elevada porosidad intercrystalina, ii) capas blanquecinas de yeso con pliegues sinsedimentarios; iii) capas de color crema de carbonato (nacolita, calcita y dolomita). En ocasiones, la laminación está cortada por el crecimiento postsedimentario de los cristales de yeso que la atraviesan; 3) En la parte superior predominan las secuencias carbonáticas micríticas de color crema, intercaladas con capas de yeso de color gris, con cristales idiomorfos de 3 a 5 mm.

Unidad 16: 59,70 a 52,00 m

Se caracteriza por una alternancia rítmica de láminas milimétricas de color negro, formadas por sedimentos orgánicos sin consolidar de tipo sapropel, con láminas micríticas de color marrón y ocre. En menor proporción, hay láminas de color gris-verdoso de limo arcilloso, con intraclastos y pequeños clastos volcánicos que distorsionan la laminación. En algunas ocasiones se observan capas centimétricas margosas. Una vez recuperados los testigos en campo se forman abundantes eflorescencias sobre la superficie.

Unidad 17: 52,00 a 44,40 m

Está formada por láminas milimétricas de marga sin consolidar de color ocre, verde y negro, limo arcilloso y arcilla limosa con abundante materia orgánica. Esta unidad se ha estudiado al microscopio y se han identificado restos de algas, fundamentalmente *Botriococcus*, y restos vegetales (esporas y cutículas de hojas). Hay niveles que presentan nódulos de carbonato y están cementados. Hacia la mitad de la unidad hay un tramo de 1,30 m de espesor de color negro de limo sapropélico, que en ocasiones contiene cantos angulosos de Rv y Rm dispersos, de 3 y 5 mm de diámetro. Se formaron eflorescencias de color blanco en superficie al extraer el testigo de la batería del sondeo.

Unidad 18: 44,40 a 25,80 m

Es una unidad muy homogénea, de 24,40 m de espesor, formada exclusivamente por sedimentos carbonosos de color negro, de limo sapropélico con mate-

ria orgánica muy degradada, amorfa y de grano muy fino (Fig. 5D). Es una unidad muy masiva, pero en algunas ocasiones, se puede distinguir laminación paralela muy difusa y pequeños restos vegetales carbonizados.

Unidad 19: 25,80 a 20,50 m

La mitad inferior de esta unidad está formada por capas decimétricas y centimétricas sin consolidar, de arcillas, margas y limos de color verde azulado. La mitad superior son capas de margas y arcillas azuladas masivas, en las que aparecen intercaladas capas centimétricas de arena muy fina limosa de color azul.

Unidad 20: 20,50 a 18,20 m

Esta unidad es muy similar a la unidad 18, pero con un espesor menor. Está integrada exclusivamente por sedimento carbonoso de color negro formado por sapropel. A techo (18,40 m) se ha realizado una datación por C^{14} AMS, obteniéndose una edad de 42.620 ± 1.490 años BP (Tabla 2).

Unidad 21: 18,20 a 14,40 m

Está compuesta por capas decimétricas de margas azules masivas, cuya composición mayoritaria es dolomita y en menor proporción esmectita. En la base de la unidad (por debajo de los 16,91 m) las margas están intercaladas con láminas centimétricas a milimétricas de limo sapropélico masivo de color negro. A techo de la unidad se han identificado estructuras de bioturbación rellenas por un sedimento de color morado. En esta unidad hay dos dataciones: (1) a 16,91 m con una edad de 30.880 ± 360 años ^{14}C BP; y (2) a 14,45 m, techo de la unidad, con una edad de 25.470 ± 210 años ^{14}C BP (Tabla 2).

Unidad 22: 14,40 a 10 m

Consiste en capas métricas y decimétricas de margas de color crema, masivas y atravesadas por estructuras de bioturbación que están rellenas por un sedimento arcilloso de color marrón. A una profundidad de 11,13 m hay un nivel con grietas de desecación, que tiene por encima una capa centimétrica de arcilla de color marrón, que la rellena. La parte superior de la unidad tiene laminación paralela. El techo está marcado por una capa centimétrica de margas de

color marrón con nódulos de color blanco, donde la laminación está distorsionada.

Unidad 23: 10 a 0 m

Es una alternancia de capas métricas y decimétricas de limo arenoso-arcilloso de color marrón, con capas métricas y decimétricas de margas de color griscrema. Mayoritariamente estas capas son masivas y tienen abundantes estructuras de bioturbación a techo (Fig. 5E). También se han identificado en las margas grietas de desecación rellenas por limo arcilloso de color marrón (7,65-7,90 m). En esta unidad hay dos intervalos de sedimentos detríticos gruesos, a 4,16-4,30 m y 0,50-0,62 m, con arena media y gruesa que contiene clastos de R_m y R_v de 3 y 4 cm de diámetro y una matriz limosa-arcillosa. En esta unidad hay tres dataciones por AMS: (1) a 6,75 m, con una edad de 16.540 ± 90 años C^{14} BP; (2) a 4,35 m, con una edad de 15.420 ± 70 años C^{14} BP; y (3) a 0,60 m, con una edad de 1.570 ± 40 años C^{14} BP (Tabla 2). Por ello, esta unidad corresponde al registro sedimentario desde el Último Máximo Glaciar y el interglaciar Holoceno (los últimos 4 m).

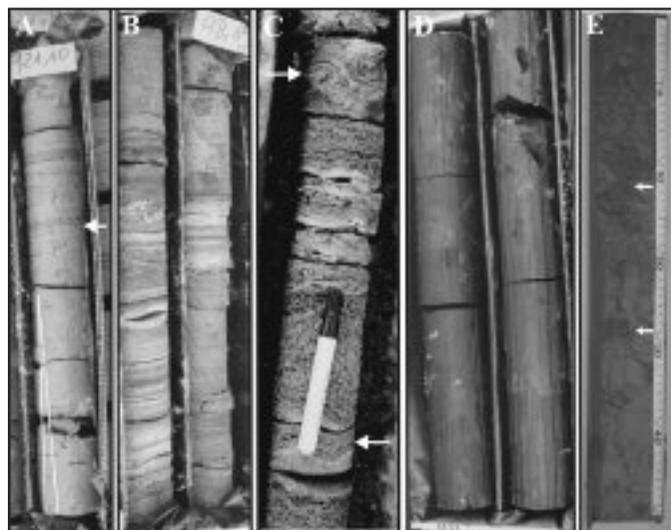


Fig. 5. Fotografías de los testigos representativos de las principales facies del registro sedimentario de la laguna de Fuentillejo. **A.** Capas detríticas gradadas y ritmitas detríticas (121,10-121,70 m). **B.** Ritmitas orgánico-carbonáticas (97,55-98,75 m). **C.** Evaporitas (60,30-60,70 m). **D.** Sapropel (26,55-27,75 m). **E.** Margas y limos masivos con estructuras de bioturbación (6,92-7,49 m)

Fig. 5. Photographs of core sections which are representative of main facies of the Fuentillejo sedimentary record. **A.** Clastic graded beds and clastic rhythmites (121,10-121,70 m). **B.** Organic-carbonate rhythmites (97,55-98,75 m). **C.** Evaporites (60,30-60,70 m). **D.** Sapropels (26,55-27,75 m). **E.** Bioturbated massive micrites and silts (6,92-7,49 m)

Interpretación/discusión

Las características principales que condicionaron la sedimentación en la laguna de Fuentillejo son: i) la circunstancia de tratarse de un sistema lacustre cerrado, ii) presenta una cuenca de drenaje de reducido tamaño y de litología uniforme y iii) tiene un régimen hidrológico simple, dominado por el balance entre precipitación y evaporación. Estos hechos favorecieron la preservación de una información detallada sobre los diferentes patrones de la sedimentación a lo largo del tiempo, como resultado fundamental de factores climáticos.

El comienzo de la sedimentación estuvo dominado, mayoritariamente, por grandes aportes detríticos, como queda reflejado en las unidades 1, 2, 3 y 4 del registro. La unidad 1 se debió originar durante los primeros episodios erosivos de las laderas interiores del cráter, que ocurrirían posteriormente a la erupción explosiva del *maar*. Durante estos episodios de gran actividad se formarían depósitos coluvionares sobre las laderas interiores, que desembocarían en la cubeta lacustre, desencadenando, a su vez, *debris-flows* y flujos turbidíticos hacia las zonas más profundas del lago. Progresivamente, los procesos de ladera se centraron en el desarrollo de tres abanicos (Fig. 2), pudiendo denominarlos como abanicos deltaicos lacustres o *fan-deltas* (Wescott y Ethridge, 1990). La unidad 3 pudo haberse originado como consecuencia de un nuevo período significativo de actividad en estos abanicos.

Este tipo de sedimentación alternó con otra típica de ambiente lacustre profundo, con la formación de ritmitas detríticas (unidades 2 y 4) que se producirían por aportes estacionales, los cuales pueden relacionarse con las condiciones paleoclimáticas (Sturm y Matter, 1978; Anderson y Dean, 1988). La preservación de las láminas sugiere una estratificación del lago y un fondo anóxico (Anderson *et al.*, 1985). También se identificaron estructuras de deformación que, probablemente, podrían haberse originado como consecuencia de procesos de sobrecarga relacionados con la sedimentación de las capas de arena (unidades 2 y 3).

Las unidades 5 y 6 suponen un gran cambio en la dinámica y la química lacustre, con la sedimentación de ritmitas con un elevado contenido en materia orgánica. Hubo una gran acumulación de restos orgánicos autóctonos, que alternaron con la sedimentación de carbonato micrítico. Como consecuencia, la productividad debió aumentar considerablemente con respecto a las unidades anteriores.

De nuevo, la unidad 7 representa un período ero-

sivo en la cuenca de drenaje, siendo muy similar a las unidades 1 y 3 citadas anteriormente. La presencia de clastos de tamaño grava englobados en arena y limo, probablemente se debe al carácter plástico del flujo, pudiendo interpretarse como *debris-flows*. Este tipo de eventos se repiten en las unidades 9 y 11, siendo estratodecrecientes en conjunto (Fig. 4).

Las unidades 8, 10, 12, 13 y 14 son típicas de ambiente profundo, con una sedimentación finamente laminada, caracterizada por el componente autóctono (ritmitas orgánicas y carbonáticas). La laminación de estas unidades se han preservado perfectamente, y ha estado favorecida por las condiciones anóxicas del fondo. Por el contrario, un fondo oxigenado podría favorecer la bioturbación de estas estructuras sedimentarias tan finas, enmascarando la laminación original (Lamoreux y Bradley, 1996). Intercaladas en estas unidades también hay capas detríticas de poco espesor, probablemente relacionadas con eventos erosivos de menor entidad en la cuenca de drenaje. Las inestabilidades de los taludes también se ponen de manifiesto, en los intervalos con deformaciones en la laminación, debido, probablemente, a deslizamientos en las zonas sumergidas de los frentes deltaicos. Sin embargo, a falta de un estudio en mayor profundidad, tampoco puede descartarse su origen por la actividad sísmica en la región de estudio.

La unidad 15 supone un nuevo cambio drástico en la sedimentación, puesto que rápidamente se formó una unidad evaporítica, que marcaría unas condiciones de elevada salinidad y la disminución brusca de la lámina de agua. La laguna sería bastante somera e, incluso, se desecaría periódicamente. La materia orgánica de esta unidad podría provenir de los tapices de cianobacterias que se desarrollan en estos ambientes (Powell, 1986). Estos indicadores apuntan hacia unas condiciones semiáridas-áridas en la región.

El comienzo de la unidad 16 marca un cambio rápido hacia condiciones de ambiente profundo, con un nivel de agua elevado. Los sedimentos de esta unidad y de la 17 están finamente laminados, predominando el componente autóctono (ritmitas orgánicas y carbonáticas).

El siguiente cambio importante en el registro se observa en la unidad 18. La formación de una potente capa de sapropel (supera los 20 m) hace pensar en un lago eutrófico. Para interpretar esta unidad se puede plantear el *modelo de productividad* (Calvert, 1983; Calvert y Pedersen, 1992) que recurre a un aumento de la producción y un rápido aporte de materia orgánica al sedimento, favoreciendo el incremento de materia orgánica enterrada y el muy bajo

contenido en oxígeno en las aguas profundas. Estas facies anóxicas profundas se formarían bajo una estratificación perenne y una elevada salinidad (Powell, 1986), lo que favorecería la preservación excepcional de la materia orgánica. Estos hechos se repitieron de nuevo en la unidad 20.

Por último, las unidades 21, 22 y 23 corresponden con una sedimentación que va siendo progresivamente de medios menos profundos, aproximadamente para los últimos 42.000 años C¹⁴ BP. Hay una alternancia de períodos lacustres someros con períodos palustres, característicos de una disminución en la lámina de agua y con frecuentes exposiciones subaéreas, que favorecieron la removilización de los sedimentos. Intercalados entre estos niveles hay depósitos de medios más profundos, que indicarían un cambio brusco entre períodos de nivel lacustre alto, con otros de nivel bajo. Se han identificado varios períodos con desecación de la laguna, remarcando ese carácter efímero. La unidad 23 corresponde al registro sedimentario desde el Último Máximo Glaciar y el Holoceno. Durante este intervalo ocurrieron varias reactivaciones de los abanicos, que tuvieron como consecuencia un aporte de sedimentos detríticos al centro de la cuenca.

Conclusión

El registro sedimentario del sondeo FU-1, realizado en la laguna del maar de Fuentillejo, está dividido en 23 unidades sedimentarias principales, que se pueden resumir en 6 tipos básicos de facies lacustres (Fig. 5):

- (1) Capas detríticas gradadas correspondientes a episodios erosivos en la cuenca de drenaje.
- (2) Ritmitas detríticas que representan la sedimentación en ambiente profundo en un lago de carácter oligotrófico, con un fuerte componente extra cuencal.
- (3) Ritmitas orgánicas-carbonáticas que corresponden a la sedimentación en ambiente profundo con una elevada productividad.
- (4) Evaporitas, debidas a la disminución de la lámina de agua, en un medio de elevada salinidad en ambiente semiárido (lago efímero).
- (5) Sapropel, que representa la sedimentación en ambiente profundo, con una elevada productividad y preservación, en un lago permanentemente estratificado y con fondo anóxico.
- (6) Margas y limos masivos con estructuras de bioturbación, desarrollados en un ambiente lacustre somero, con episodios de desecación.

Aún falta por determinar la edad para el comienzo del registro de FU-1. Ahora bien, las dataciones radiométricas realizadas en los 18 primeros metros superiores, señalan que el techo de la unidad 20 tiene una edad aproximada de 42.620 años C¹⁴ BP (por el momento es la edad más antigua conseguida por este método). La unidad 21 comprendería el intervalo entre unos 30.880-25.470 años C¹⁴ BP. La unidad 23 corresponde al registro sedimentario desde el Último Máximo Glaciar y durante el interglaciar Holoceno.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2004-062121/BTE "Variabilidad climática y ambiental en el centro de la Península Ibérica durante el Cuaternario. Estudio de alta resolución del registro lacustre del sondeo FU-1 (laguna de Fuentillejo, Ciudad Real)" y por el proyecto interno del IGME "Estudio Paleoclimático del Maar de Fuentillejo" (CC 54.020). Los autores agradecen a César Viseras y a Jesús M. Soria su inestimable ayuda por las correcciones realizadas al manuscrito.

Referencias

- Alberdi, M.T., Jiménez, E. Mazo, A.V. Morales, J., Sesé, C. y Soria, D. 1987. Paleontología y biostratigrafía de los yacimientos villafranquienses de Las Higuieruelas y Valverde de Calatrava II (Campo de Calatrava, Ciudad Real). I 49 Reunión de Estudios Regionales de Castilla-La Mancha (Albacete, mayo, 1984). Serie Actas 5. Espacio y Sociedad, 3, 255-277.
- Ancochea, E. 1983. Evolución espacial y temporal del vulcanismo reciente de España Central. Tesis Doctoral, Editorial Universidad Complutense, Madrid, 675 pp.
- Anderson, R.Y., Dean, W.E. 1988. Lacustrine varve formation through time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 62, 215-135.
- Anderson, R.Y., Nuhfer, E.B. y Dean, W.E. 1985. Sedimentation in a blast-zone lake at Mount St. Helens, Washington-Implications for varve formation. *Geology*, 13, 348-352.
- Bonadonna, F.P. y Villa, J.M. 1984. Estudio geocronológico del vulcanismo de las Higuieruelas. I Reunión Estratigrafía Regional Castilla-La Mancha (Albacete). *Espacio y Sociedad*, III, 249-253.
- Büchel, G. 1993. Maars of the Westeifel, Germany. En: J.F.K. Negendank y B. Zolitschka (eds.), *Paleolimnology of European Maar Lakes*, Springer-Verlag, 1-13.
- Calvert, S.E. 1983. Geochemistry of Pleistocene sapropels and associated sediments from the Eastern Mediterranean. *Oceanologica Acta*, 6, 225-267.

- Calvert, S.E. y Pedersen, T.F. 1992. Organic carbon accumulation and preservation in marine sediments: How important is anoxia?. En: J.K. Whelan y J.W. Farrington (eds.), *Productivity, Accumulation and Preservation of Organic Matter in Recent and Ancient Sediments*. Columbia University Press, New York, pp. 231-263.
- Colman, S.M. (ed.) 1995. *Continental Drilling for Paleoclimatic Records*. PAGES 96-4, <http://pages.unibe.ch/products/reports/Contidriill/0toc.html>
- European Lake Drilling Programme (ELDP) 1997. *An ESF research programme to further the recovery and interpretation of lacustrine paleoclimatic archives*, <http://www.esf.org>
- Gallardo-Millán, J.L. 2004. *Evolución geodinámica de las cuencas neógenas del Campo de Calatrava (Ciudad Real) y su relación con el volcanismo reciente*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. (Inédita)
- Gallardo Millán, J.L., Ancochea, E. y Pérez-González, A. 2002. Secuencia magnetoestratigráfica y edad de los materiales volcánicos y sedimentarios de Poblete (Ciudad Real). *Geogaceta* 32, 35-38.
- Gallardo-Millán, J.L., Gomis, E., Dinarés, J. y Pérez-González, A. 1998. Relación entre las polaridades paleomagnéticas y las edades radiométricas del volcanismo de Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Geogaceta* 22, 59-62.
- Gallardo-Millán, J.L. y Pérez-González, A. 2000. Magnetoestratigrafía del relleno neógeno en las cuencas del Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Geotemas* 1, 101-104.
- González-Cárdenas, E. 1997. Secuencias eruptivas y formas del relieve en los volcanes del sector oriental del Campo de Calatrava. En: E. González-Cárdenas y J.L. García Rayego (coord.), *Elementos del medio natural en la provincia de Ciudad Real*, UCLM, Tarancón, Cuenca, 161-201.
- González-Cárdenas, E., García, J.L., Gosálvez, R.U., Morales, M. y Peinado, M. 2002. Los geosistemas lagunares de origen volcánico del Campo de Calatrava: Funcionamiento y dinámica reciente. En: A. Pérez-González, J. Vegas y M.J. Machado (eds.), *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*. Instituto Geológico y Minero de España - Sociedad Española de Geomorfología, Madrid, 395-403 pp.
- Granda, A., Granda, T., Madrid, A., Granda, A.A., García-Baquero, F., Rodríguez, R y El Charef, E. 2000. *Informe técnico trabajos geofísicos en la laguna de Fuentillejo (Ciudad Real)*. Internacional Geophysics Technology (IGT). (IGME, Inédito).
- Hernández-Pacheco, F. 1921. El yacimiento de mamíferos de Valverde de Calatrava y edad de los volcanes de la provincia de Ciudad Real. *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*, Tomo extraordinario del Cincuentenario, 98-114.
- Hernández-Pacheco, F. 1932. *Estudio de la región volcánica central de España*. Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, Tomo III, 235 pp.
- Lamoureux, S.F. y Bradley, R.S. 1996. A late Holocene varved sediment record of environmental change, northern Ellesmere Island, Canada. *Journal of Paleolimnology* 16, 239-255.
- Pérez-González, A., Vegas, J. y García-Cortés, A. 2003. Maar Programme for the Central Spanish Volcanic Field. An initiative for the study of Quaternary climatic change. En: M. Ruiz Zapata, M. Dorado, A. Valdeolillos, M.J. Gil García, T. Bardají, I. de Bustamente y I. Martínez Mendizábal (eds.), *Quaternary Climatic Changes and Environmental Crises in the Mediterranean Region*. Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, 215-219 pp.
- Poblete, M.A. 1993. Morfología y secuencia eruptiva del cráter explosivo de la Posadilla (Campo de Calatrava, Ciudad Real). *ERIA*, 51-59.
- Poblete, M.A. 1995. *El relieve volcánico del Campo de Calatrava (Ciudad Real)*. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Gijón, 467 pp.
- Portero, J.M., Ramírez, J.I., Ancochea, E. y Pérez-González, A. 1988. Mapa Geológico de España 1:50.000 (MAGNA). Hoja N° 784 (Ciudad Real). IGME.
- Powell, T.G. 1986. Petroleum geochemistry and depositional setting of lacustrine source rocks. *Marine and Petroleum Geology* 3, 200-219.
- Schnurrenberger, D., Kelts, K., Johson, T., Shane, L., e Ito, E. 2001. National lacustrine core repository (LacCore). *Journal of Paleolimnology* 25, 123-127
- Schnurrenberger, D., Russell, J. y Kelts, K. 2003. Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology* 29, 141-154.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., VanderPlicht, J. y Spurk, M. 1998. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal. BP. *Radiocarbon* 40, 1041-1083.
- Sturm, M. y Matter, A. 1978. Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland): deposition of clastic detritus by density currents. En: A. Matter & E. Tucker (eds.), *Modern and Ancient Lake Sediments*. Spec. Publ. Int. Ass. Sediment. 2, 147-168.
- Vegas, J., Galán, L., García-Cortés, A. y Pérez-González, A. 2004a. División longitudinal de sondeos de investigación paleoclimática realizados en registros sedimentarios sin consolidar ricos en arcilla. La guillotina de corte electroosmótico del IGME. *Geo-Temas* 6(5), 161-163.
- Vegas, J., Galán, L., Pérez-González, A. y García-Cortés A. 2004b. El archivo lacustre del maar de Fuentillejo (Campo de Calatrava). Primeros protocolos científicos y estrategia de trabajo para el estudio paleoclimático del Cuaternario en el centro de España. *Boletín Geológico y Minero* 115, 641-650.
- Wescott, W. y Ethridge, F. 1990. Fan deltas-Alluvial fans in coastal settings. En: A. Rachoki y M. Church (eds.), *Alluvial fans, a field approach*. John Willey & Sons, New York. 195-213 pp.

Recibido: febrero 2006

Aceptado: mayo 2006