



**CUARTO SIMPOSIO
SOBRE EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**



AGOSTO 10 - 12. 1982

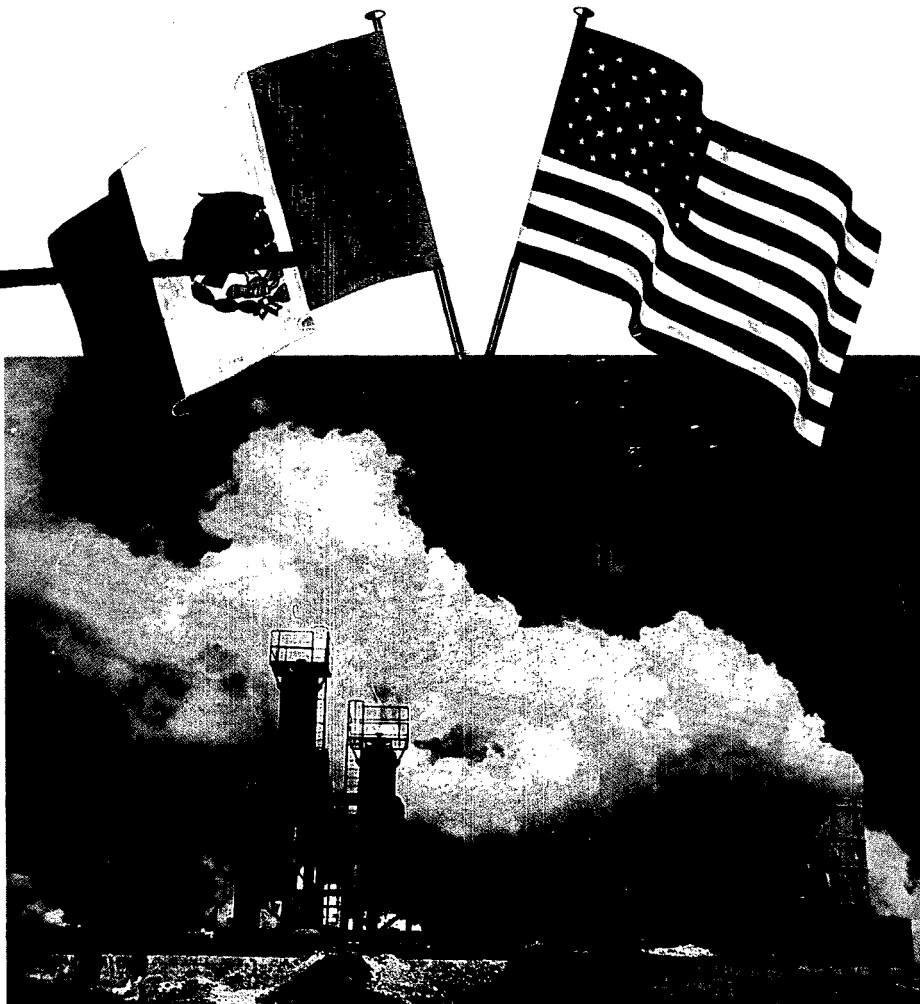
GUADALAJARA, JAL.

Organizado por

Comisión Federal de Electricidad

en cooperación con el

United States Department of Energy,
Division of Geothermal Energy



**ACTAS/PROCEEDINGS
VOLUMEN 2**



Coordinadora Ejecutiva
de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California
México



Earth Sciences Division,
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720

MICROFOSSILS FROM CERRO PRIETO GEOTHERMAL WELLS, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Mary Lou Cotton
Department of Geological Sciences
University of Southern California
Los Angeles, California
(Present address: U.S. Geological Survey,
Los Angeles, California)

Stephen Vonder Haar
Earth Sciences Division
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720

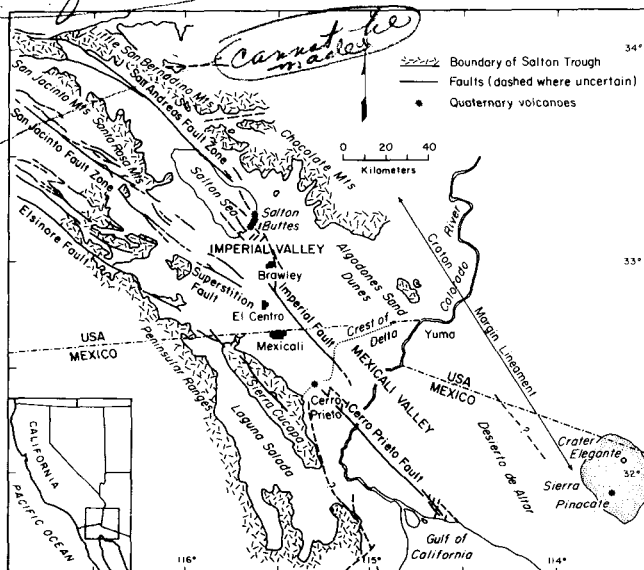
ABSTRACT

To aid in a paleoenvironmental and age reconstruction of the Cerro Prieto reservoir system, ~~we analyzed~~ ^{were analyzed} 59 samples of well cuttings for microfossils. The cuttings were obtained at depths from 351 to 3495m in 14 geothermal wells in the Cerro Prieto field, Baja California, México. ~~We found foraminifera in 6 samples, ostracodes in 19 samples, and~~ ^{was found} manoplankton as coccoliths in 24 samples. Other groups, such as molluscs, insects, fish skeletal parts, and plant material were occasionally present. ~~We cannot make detailed interpretations at this time because of poor preservation of samples.~~ This is primarily due to causes: dissolution by geothermal fluids that reach 350°C, and the extensive mixing of filled Cretaceous forms (reworked from the Colorado Plateau region) with Tertiary species during drilling. Further studies of ostracodes and foraminifera from colder portions of the wells are needed. The abundant and well-preserved ostracodes indicate marine to brackish water environments that correspond, in part, to lagoonal or estuarine facies. The presence of the mid-Tertiary (15-m.y.-old) marine foraminifera, Cassigerinella chipolensis, in wells M-11 and M-38, 350 to 500m deep, is perplexing. These are not laboratory contaminants and, as yet, have not been found in the drilling mud. If further studies confirm their presence at Cerro Prieto, established ideas about the opening of the Gulf of California and about Pacific Coast mid-Tertiary history will need to be rewritten.

INTRODUCTION

This study was intended to provide an examination of any microfossils present in subsurface samples from the Cerro Prieto geothermal field (Fig. 1), and to correlate the fossils to a general age range and paleoenvironment. Of the 55 wells at the field, 14 were selected to give a range of both exploration and production wells (see Fig. 2 for well

locations). Some wells, such as Prian, were selected because of their cool water (100°C), compared with the fluids in the geothermal reservoirs (350°C). Well-cutting samples were collected from depths between 351 and 3495m in the caprock units, the main reservoir, and the shale and siltstone interbeds.



XBL 801-6718

Figure 1. Location map showing the Cerro Prieto geothermal field in the southern Salton Trough, México.

In general, the geology at Cerro Prieto consists of a mixed deltaic environment (Fig. 3) in the southern Salton Trough (Puentes C. and de la Peña L., 1979; Noble et al., 1977), similar to that of the East Mesa geothermal field 60 km to the north (Howard et al., 1979). However, Cerro Prieto appears to have had a greater marine influence from the Gulf of California than East Mesa does. Cerro Prieto is highly faulted with a major structural feature, the Cerro Prieto fault, bisecting the geothermal field (Vonder Haar and Puentes C., 1979a,b).

DISCLAIMER

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency Thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Accepted laboratory methods used in micropaleontology were employed to assure that the samples were as uncontaminated as possible. We assumed initially that samples represented the sedimentary and stratigraphic level from which they were obtained in given well. For those not familiar with microfossils, an excellent general overview is given by Haq and Boersma (1978).

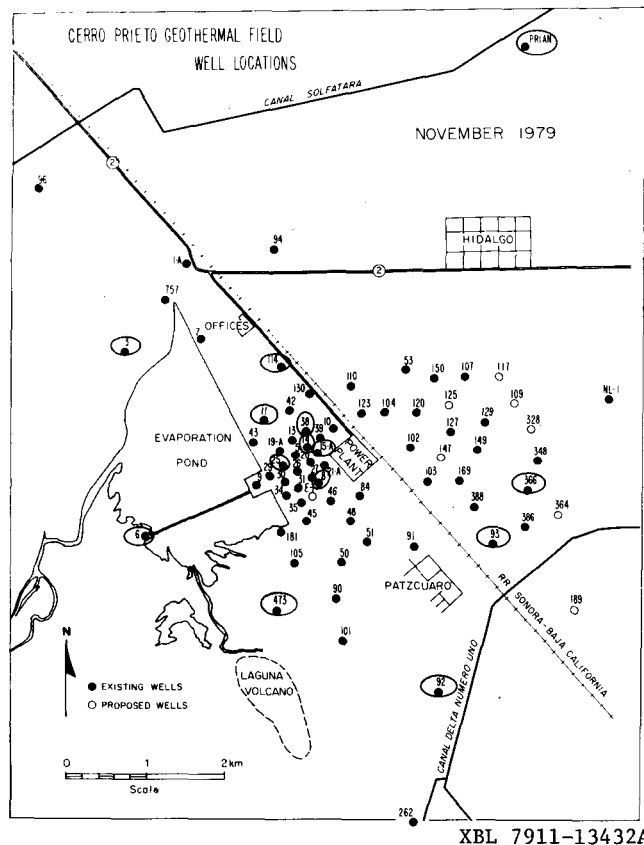


Figure 2. Geothermal wells that were used in the micropaleontology study (circled).

LABORATORY PROCEDURES

All samples were soaked in water before washing. Initial attempts to break densified shale and slate samples by using kerosene proved futile, and that process was discarded. After soaking, samples that had not broken apart completely, particularly those with a high clay or silt fraction, were boiled for approximately 15 min on a hot plate. Except for those rock samples that were highly desified, all disaggregated well.

A small portion of the supernatant solution from each sample was removed before washing, placed in a large beaker, and dried; this portion was used to analyse calcareous nannofossils, which are typically smaller than 5 μm in diameter. The remainder of

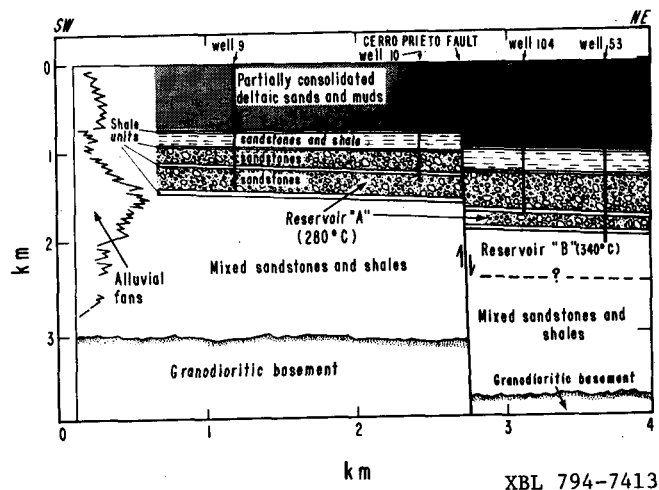


Figure 3. Simplified geologic section across the earliest developed portion of the Cerro Prieto geothermal field (from Vonder Haar and Puente C., 1979a).

the sample was washed completely through a standard number 230 screen (opening 62 μm in diameter) to remove silt and clay-sized particles. The sand fraction was then drained through filter paper and dried.

When both portions of each of the samples were completely dry, one of two procedures was carried out:

1. **Calcareous nannofossil procedure:** A very small amount of the dried residue from the supernatant solution was scraped from the bottom of the baker in which it was dried and placed on a 1-mm-thick glass microscope slide. Three or four drops of Caedax fixative (a synthetic Canada balsam) were placed on this sediment, covered by a cover glass, placed on a hot plate, and allowed to heat to boiling for several minutes. This procedure bonds the cover glass to the slide and fixes the sediment and its inclusions in place. Examination of these prepared slides was carried out by the use of a Zeiss petrographic transmitted light microscope, using both dry and oil-immersion lenses. Photographs of the calcareous nannofossils were taken with a similar microscope which has a camera attachment.

2. **Larger calcareous microfossil procedure:** After drying, each sample was sieved through a series of screens: number 18 (opening 1 mm), number 40 (opening 425 μm), number 80 (opening 180 μm), and number 140 (opening 105 μm). Each fraction of the sediment was examined in small amounts under the microscope (just enough to completely

cover the bottom of a standar 45 square picking tray). The microscopes employed were an AO/Spencer biopetrographic light microscope and a Zeiss biopetrographic light stereomicroscope. Progressively smaller fractions were examined until the entire sample had been looked at and any fossils encountered removed by use of a number 0 picking brush. Fossils were placed in standard one-hole micropaleontologic faunal slides, where they were kept until identification.

MICROFANAL AND FLORAL ANALYSIS

Table 1 lists the microfossils encountered in various samples. Many of samples were barren; these tended to be samples composed mainly of the gray dense shale or slate material, although for 0473-567m, (well 0-473, at 567m depth) ostracodes were found imbedded in the shale. Ostracodes and calcareous nannoplankton (as coccoliths) were the most abundant fossil groups found; foraminifera were found in only 6 of the 59 samples examined. Other groups, such as molluscus, insects, and fish skeletal parts, were found in small quantities. Some plant material was also encountered (see Table 2).

Foraminifera

Foraminifera are members of the phylum Protozoa, class Sarcodina, and are in essence amoebas that secrete elaborate calcareous shells ("Tests"), or construct an agglutinated test by means of a secreted organic cement (Loeblich and Tappan, 1964). In the first analysis of the samples, only one or two foraminifera were found. Because several of the samples were very fine sands, which contained other calcareous microfossils and could be expected to contain foraminifera, this paucity was difficult to understand. Merriam and Bandy's (1965) study provided an explanation. Bandy described small (100 to 200 μ m), perhaps juvenile (only one or two chambers) reworked Cretaceous specimens from the sandy sediments of the region. On reexamination of the sandy Cerro Prieto samples (particularly the fine fraction) under the highest power of the microscope (100X), we observed very small foraminifera of similar size. Yellow-filled Cretaceous planktic foraminifera were found in samples M8 694m, M11-470m, and M38-372m. Figures 4 and 5 show examples of this type of foraminifera. One Tertiary marine species, Cassigerinella sp. cf. C. Chipolensis (Cushman and Ponton) (Fig. 6) was also identified in samples M11-351m, M11-470m, and M38-480m. Other very small foraminifera, however, defied identification. We do not know whether they are Cretaceous or Tertiary,

benthic or planktic (Douglas, 1979, oral commun). Attempts at identification were made, but the extremely small size of the specimens makes positive identification impossible. Some of the individual may be juveniles, a factor which complicates identification. Table 3 lists those foraminifera identified with an amount of certainty in the six foraminifer-containing samples (Figs. 4, 5, and 6).

Calcareous nannoplankton

Coccoliths are the skeletal remains of members of the algal class Haptophyceae. Table 1 lists samples that contained coccoliths. Readily identified species were taken from samples Prieto 3495m, M6-1245m, and 0473-1434m. Most of the samples contained reworked Cretaceous species, such as Watznaueria barneseae Perch-Nielson, but a few Tertiary nannofossils, such as discoasters and sphenoliths, were observed (Table 4).

Ostracodes

Ostracodes belong to the phylum Arthropoda, class Crustacea, and are small shrimp-like organisms that secrete a bivalved shell known as a carapace. This carapace is the part of the animal that can become fossilized. Ostracodes molt several times during their lives, and these stages or "instars" are also preserved in the geologic record through fossilization of the various carapaces (Pokony, 1978). Many complicated criteria are used to identify individual species, including the type of hinge that articulates the two valves, muscle attachment scars, and valve margin structures.

Many of the samples from the Cerro Prieto area contained ostracode valves or fragments (Tables 1 and 2). The specimens have smooth, thin shells, with no strong ornamentation, which indicates that they are from a low-energy marine or brackish water environment. The pores, margins, and inner surfaces of the valves are well-preserved, which indicates that they are not very old; in fact, the ostracodes encountered in the samples, although not identified as to genus or species, appear to be of Holocene age (McRaney, 1979, oral commun).

INTERPRETATION OF DATA

Several problems present themselves in the samples from the Cerro Prieto area; the most obvious are the apparent contamination during drilling and hydrothermal alteration.

The first problem is typified by the presence of ostracodes at all levels in

TABLE 1. CHECKLIST BY GEOTHERMAL WELL AND SAMPLE
DEPT OF MICROFOSSILS FROM CERRO PRIETO

Well	Sample depth (m)	Foram- inifer	Ostracodes	Nanno- fossils	Other
M3	839				
	2339			X	X
	2500			X	
M4	1200			X	
	1975			X	
M6	962		X		
	1245			X	
M8	964	X	X		
	906			X	
	1167			X	X
	1265				
M11	351	X	X	X	X
	470	X	X	X	X
	678		X		
	753		X	X	X
	879				
	882				
	912				
	921				
	1050				
	1161				
	1245				
	1365				
	1377				
M14	786		X	X	
	1041			X	
	1254				
M15	693	X	X	X	
	1008			X	
	1164			X	
M38	372	X	X		X
	480	X	X		
	718		X		
	864				
	961				
	969				
	1157				
	1239				
	1338				
	1479				
	1490				
M92	1998			X	
	2202			X	
	2446			X	
M93	1806			X	
	138		X	X	X
	606		X	X	
	996				
	1158				
	1680				
	1897				
O473	567		X	X	
	804				
	1062		X		
	1434			X	
Prian	3243		X		
	3495		X	X	
T366	2052				X
	2601				

the wells. Although their presence in shallow samples (such as M38-372m, M38-480m, M11-138m) is certainly expected and reasonable, in deep samples (M38-969m Priar-3495m) ostracodes indicate far too much downward displacement to be explained by natural reworking of the sediments. This phenomenon can also be observed in the calcareous phenomenon can also be observed in the calcareous nannofossils, when shallow samples (M11-470m) contain Cretaceous specimens, and deep samples Tertiary forms (O473-1434m). Because nannofossils are extremely small, they are, of course, easily transported and reworked; the degree of displacement in these samples; however, appears to be introduced by mud recirculating during drilling operations. Very great care was taken in laboratory preparation in order to prevent contamination during that procedure.

There are so few foraminifera present in the samples that it is difficult to draw conclusions from them. The systematic ambiguity of the very small specimens limits them as an aid to identifying either the age or paleoenvironment of the Cerro Prieto field, and prevents us from making a judgment in either regard. The fact that the small specimens are all of similar size indicates that they were transported and winnowed into position. The three or four benthic foraminifera we found are badly preserved, and we can not form a hypothesis about their paleoenvironment. Our inability to identify the small individuals also prevents us from assigning an age to the samples.

Colorado River sediments of the northern Gulf of California were largely deposited during a post-Pleistocene sea-level rise. The area is now largely nondepositional, and the sediments left in the northern gulf region are relict sediments (van Andel, 1964). Merriam and Bandy (1965) classified samples taken from near the Cerro Prieto area as "recent delta" sediments. Reworked Cretaceous foraminifera found in the samples probably are derived from the highly fossiliferous Upper Cretaceous Mancos shale of the Colorado Plateau, through which the Colorado River flows (Merriam and Bandy, 1965).

Mid-Tertiary marine Cassigerinella chipolensis in wells M-38 and M-11 at depths of 350 to 500m may be of major geologic importance. These foraminifera are not laboratory contaminants and, as yet, have not been located in samples of the drilling mud or in the mud pits next to the wells. There are no know

TABLE 2. COMPLETE LISTING OF SHELL FRAGMENTS AND OTHER ORGANIC REMAINS
IN THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL WELL SAMPLES STUDIED

Well	Depth (m)	Fossils found*	Well	Depth (m)	Fossils found*
M3	839	B	M38	372	O, F, S
	2339	N, I		480	O, F
	2500	N		718	O
				864	B
M4	1200	N		961	O
	1975	N		969	O
				1157-	
M6	962	O		1490	B
	1245	N			
M8	964	O, F	M92	1998	N
	906	N		2202	N
	1167	N, I		2446	N
	1265	B	M93	1806	N
M11	351	S, G, O, N, F	M114	138	G, P, O, N
	470	S, G, O, N, F		606	O, N
	678	O		996	B
	753	O, N		1158	B
	879-			1680	B
	1377	B		1897	N
M14	786	O, N	0473	567	N, O
	1041	N		804	B
	1254	B		1062	O
				1434	N
M15	693	O, N, F	Prian	3243	O
	1008	N		3495	O, N
	1164	B			
M25	486	O	T366	2052	I
	1041	O, N, I		2601	B
	1242	N, I			

Key: B = barren; F = foraminifera; G = gastropod; I = insect parts;
N = nannofossils; O = ostracods; P = pelcypod; S = shell fragments

outcrops or subsurface units in the Salton Trough from which this microfossil could have been reworked. Their age (approximately 15m m.y.) is much in excess of any reported samples from the Salton Trough and Gulf of California. Further studies of Cerro Prieto well cuttings should be undertaken to search for a suite of specimens. If the presence of Cassigerinella chipolensis is confirmed, it will affect current theories about the opening of the Gulf of California and about Pacific coast mid-Tertiary history.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to thank Dr. Robert G. Douglas of the Department of Geological Sciences, University of Southern California, and Dr. James Ingle, Jr., Stanford University, for their

in examining the foraminifera; Dr. Merton Hill, III, of the Union Oil Company Research Division, Brea, California, for his examination of the calcareous nannafossils; and Mr. John McRaney of the Department of Geological Sciences, University of Southern California, for his examination of the ostracodes. The photographic facilities and equipment were provided by Dr. Robert Osborne of the Department of Geological Sciences, with assistance provided by Robert C. Scheidemann, Jr. both of University of Southern California. Special thanks go to our Mexican colleagues at Cerro Prieto for collecting the samples and for furnishing a preliminary geologic model of the field.

Work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy Division of Geothermal Energy, under

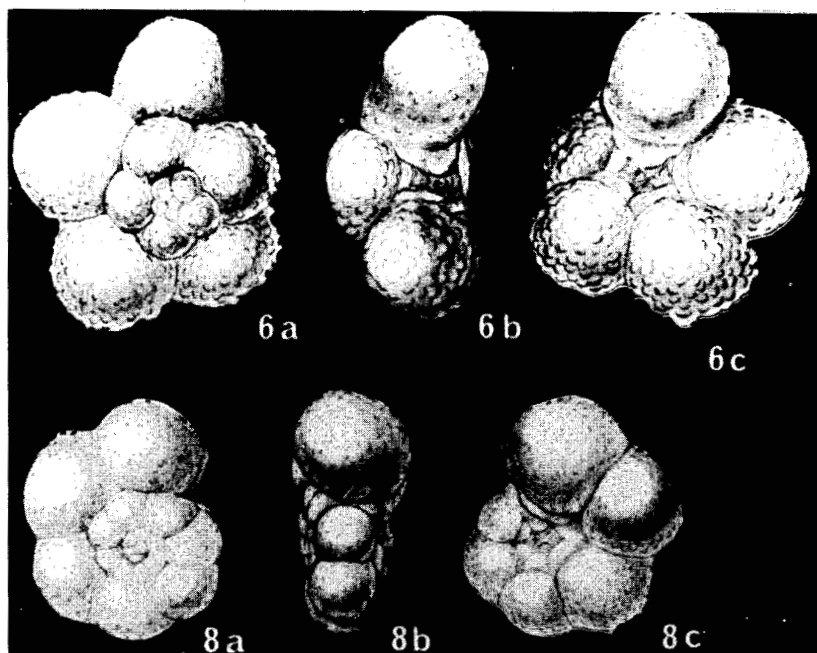


Figure 4. *Hedbergella holmdelensis* (from Sliter, 1968). A reworked Cretaceous foraminifer from the Colorado Plateau found in the deltaic sediments of well M-11. Actual size of each foraminifer is 0.15 mm.

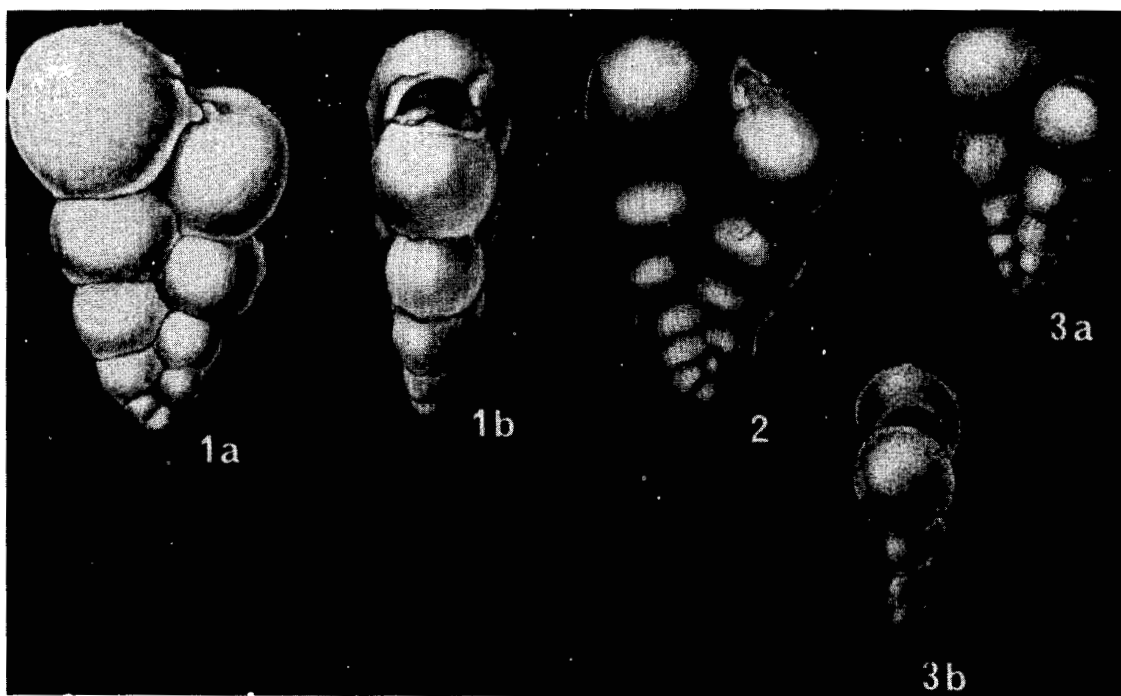


Figure 5. *Heterohelix globulosa* (from Sliter, 1968). A reworked Cretaceous foraminifer from the Colorado Plateau found in well M-8. Actual size of each foraminifer is approximately 0.25 mm.

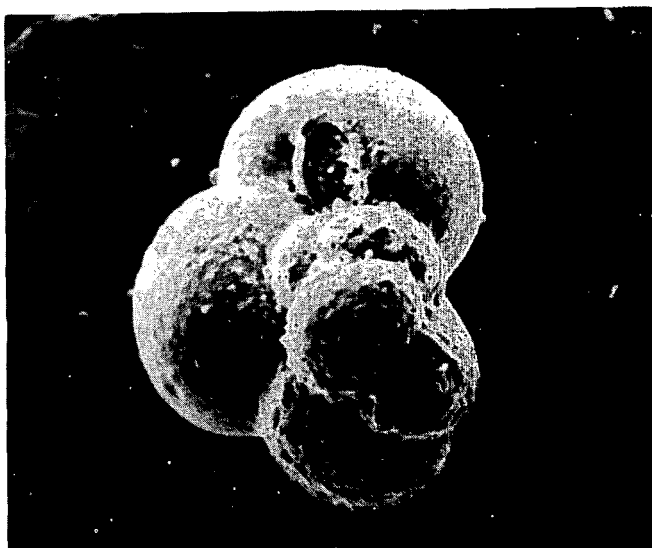
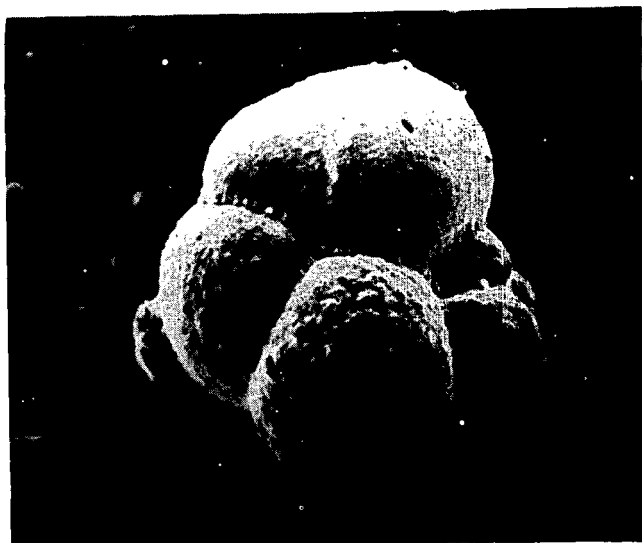


Figure 6. Two views of the Tertiary foraminifer Cassigerinella chipolensis (Stainforth et al., 1975) found in the Cerro Prieto well cuttings. These scanning electron microphotographs were provided by J. L. Lamb, EXXON Production Research, Houston, Texas. Actual size of the foraminifers is 1.0 mm.

contract W-7045-ENG-48.

Reference to a company or product name does not imply approval or recommendation of the product by the University of California or the U.S. Department of Energy to the exclusion of others that may be suitable.

TABLE 3. FORAMINIFERA IDENTIFIED WITH CERTAINTY IN THE CERRO PRIETO WELL SAMPLES

Well	Depth (m)	Foraminifera Found
M11	351	<u>Cassigerinella</u> sp. cf. <u>C. chipolensis</u> (Cushman and Ponton)
M11	470	<u>C. sp.</u> cf. <u>C. chipolensis</u> <u>Hedbergella</u> sp. cf. <u>H. holmdelensis</u> (Olsson)
M8	694	<u>Heterohelix globulosa</u> (Ehrenberg) possible benthic form
M15	693	Possible Cretaceous globigerine form
M38	372	<u>Hedbergella</u> sp. cf. <u>H. monmouthensis</u> (Olsson)
M38	480	<u>C. sp.</u> cf. <u>C. chipolensis</u> <u>Globigerina</u> Possible Tertiary turborotalids

References used as aids in identification include Loeblich and Tappan (1964), Sliter (1968), and Stainforth, et al., (1975).

TABLE 4. NANOPLANKTON OBSERVED IN CERRO PRIETO WELL CUTTINGS.

Well	Depth (m)	Nannoplankton Found
M6	1245	<u>Zygodiscus diplogrammus</u> Gartner <u>Lithraphadites carniolensis</u> Deflandre <u>Tranolithus</u> sp. <u>Watznaueria barneseae</u> Perch-Nielsen <u>Vagalapilla</u> sp. <u>Eifellithus turrisseifelli</u> Deflandre <u>E. eximius</u> Perch-Nielsen
M11	470	<u>Nannoconus multicaus</u> Deflandre and Deflandre-Rignaud <u>W. barneseae</u>
M92	2466	<u>Micula</u> sp. cf. <u>M. staurophora</u>
0473	1434	<u>Discoaster</u> sp. cf. <u>D. deflandrei</u> Bramlette and Riedel base of sphenolith
Prian	3495	<u>W. barneseae</u>

References used as aids in identification include Bramlette and Sullivan (1961) and Hill (1976)

REFERENCES CITED

- Bramlette, M., and Sullivan, F., 1961, Cocolithophorids and related nannoplankton of the early Tertiary in California: Micropaleontology, v. 7, p. 129-188.
- Haq. B. 1978, Calcareous nannoplankton, in Haq. B., and Boersma, A., eds., Introduction to marine micropaleontology: New York, Elsevier, p. 79-108.
- Haq, B., and Boersma, A., eds., 1978, Introduction to marine micropaleontology: New York, Elsevier, 376 p.
- Hill, M.E., III, 1976, Lower Cretaceous calcareous nannofossils from Texas and Oklahoma: Paleontographica, Abt. B., v. 156, no. 4-6, p. 103-179.
- Howard, J. H., et al., 1979, Geothermal resource and reservoir investigation of U.S. Bureau of Reclamation leaseholds at East Mesa, Imperial Valley, California: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7094, 305 p.
- Ingle, J. C., Jr. 1974, Paleobathymetric history of Neogene marine sediments, northern Gulf of California, in Geology of peninsular California guidebook for fields trips: Amer. Assoc. Pet. Geol. SEPM, SEG Pacific Sec., pp. 121-138.
- Leoblich, A., and Tappan, H., eds., 1964, Protista, Sarcodina --chiefly Theamiebiana and Foraminiferida: Geol. Soc. Amerc., and Univ. of Kansas Press, 900 p., 2 vols.
- Merriam, R., and Bandy, O. L. 1965, Source of upper Cenozoic sediments in Colorado delta region: Jour. of Sedimentary Petrology, v. 35, p. 911-916.
- Noble, J. E., Mañón M., A., Lippmann, M. J., and Witherspoon, P.A., 1977, A study of the structural control of fluid flow within the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México: Berkeley Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7001, 14 p.
- Pokony, V., 1978, Ostracodes, in Haq, B., and Boersma, A., eds., Introduction to marine micropaleontology: New York, Elsevier, p. 109-150.
- Puente C., I., and de la Peña L., A., 1979, Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto, in Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, Septmeber 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 17-37.
- Sliter, W.V., 1968, Upper Cretaceous foraminifera from southern California and northwestern Baja California, México: Lawrence, Kansas, Univ. of Kansas Press, Univ. of Kansas Paleontological Contrib., Article 7, 141 p.
- Stainforth, R., Lamb., J., Luterbacher, H., Beard., J., and Jeffords, R., 1975, Cenozoic planktonic foraminiferal zonation and characteristics of index forms: Lawrence, Kansas, Univ. of Kansas Press, Univ. of Kansas Paleontological Contrib., Article 62, 425 p.
- Van Andel., T., 1964, Recent marine sediments of Gulf of California, in van Andel., T., and Shor, G., Jr., eds., Marine geology of the Gulf of California: Tulsa, Am. Assoc. Petrol. Geologists, Memoir 3, p. 216-310.
- Vonder Haar., S., and Puente C., I., 1979a, Fault intersections and hybrid transform faults in the southern Salton Trough geothermal area, Baja California, México: Trans. Geothermal Resources Council v. 3. p. 761-764. 1979b, Transform faulting related to geothermal energy in Baja California, México: Geological Society of America, Abst. and Program, v. II, no. 7, p. 533.

RESUMEN

Con objeto de ayudar a reconstruir el paleoambiente y la edad del sistema del yacimiento de Cerro Prieto analizamos 59 muestras de recortes de pozo para investigar los microfósiles. Los recortes se obtuvieron a profundidades de 351 a 3495 m en 14 pozos geotérmicos del campo de Cerro Prieto, Baja California, México. Encontramos foraminíferos en 6 muestras, ostrácodos en 19 muestras y nanoplancton en forma de cocolitos en 24 muestras. Algunas veces encontramos otros grupos, tales como moluscos, insectos, partes óseas de peces y material vegetal. Por el momento no podemos interpretar detalladamente los resultados debido a la mala conservación de las muestras. Esto se debe sobre todo a dos causas: la disolución por el fluido geotérmico que alcanza una temperatura de 350°C y la mezcla en alto grado de formas cretáceas rellenadas (reubicadas desde la región de la Mesa del Colorado) con especies terciarias durante la perforación. Se requirieron estudios adicionales de los ostrácodos y foraminíferos de las porciones más frías de los pozos. La abundancia de ostrácodos bien conservados indica ambientes de agua salina que parcialmente corresponden a facies de laguna o estuario. La presencia de *Cassigerinella chipolensis*, foraminíferos marinos de mediados de la era terciaria (15 millones de años de antigüedad), en los pozos M-11 y M-38, entre 350 y 500 m de profundidad, es desconcertante. Esto no es una contaminación de laboratorio y hasta ahora no se han encontrado en el lodo de perforación. Si en estudios posteriores se confirma su presencia en Cerro Prieto, será necesario volver a elaborar las ideas establecidas acerca de la formación del Golfo de California y de la historia de la costa del Pacífico a mediados del terciario.

INTRODUCCION

El propósito del presente estudio fue examinar cualesquier microfósiles presentes en las muestras subsuperficiales del campo geotérmico de Cerro Prieto (Figura 1) y correlacionar los fósiles con una escala de edad y un paleoambiente generales. Se seleccionaron 14 de los 55 pozos del campo a fin de tener una variedad de pozos exploratorios y productores (en la Figura 2 se muestra la ubicación de los pozos). Algunos pozos, como el Prian, se seleccionaron a su agua

más fría (100°C) en comparación con el fluido de los yacimientos geotérmicos (350°C). Las muestras de recortes de pozo se recolectaron a profundidades de 351 a 3495 m en la capa sello, en el yacimiento principal y en las capas intermedias de lutita y limolita.

En general, la geología de Cerro Prieto consiste en un medio deltaico combinado (Figura 3) situado al sur de la depresión Salton (Puente y de la Peña, 1979; Noble et al., 1977), similar al del campo geotérmico de East Mesa a 60 Km al norte (Howard et al., 1979). Sin embargo, parece que Cerro Prieto ha experimentado una mayor influencia marina del Golfo de California que East Mesa. Cerro Prieto tiene numerosas fallas y un rasgo estructural mayor, la falla de Cerro Prieto, que divide en dos partes al campo geotérmico (Vonder Haar y Puente, 1979a, b).

Se emplearon métodos aceptados de laboratorio que se aplican en micropaleontología a fin de asegurar el menor grado posible de contaminación de las muestras. Inicialmente supusimos que las muestras representaban el nivel sedimentario y estratigráfico de donde se obtuvieron en un pozo determinado. Para quienes no estén familiarizados con los microfósiles, Haq y Boersma (1978) proporcionan un excelente estudio general.

PROCEDIMIENTOS DEL LABORATORIO

Todas las muestras se remojaron en agua antes del lavado. El intento inicial de desagregar con queroseno las muestras densificadas de lutita y esquisto fue ineficaz, por lo cual se descartó ese proceso. Después de remojarlas, las muestras que no se habían separado por completo, particularmente las que tenían una fracción elevada de arcilla o limo, fueron hervidas durante unos 15 minutos en un hornillo. A excepción de las muestras altamente densificadas, todas se desagregaron bien.

Antes del lavado se removió una pequeña porción de la solución sobrenadante de cada muestra, para después colocarla en un vaso grande de laboratorio y desecarla; esta porción se usó para analizar los nanofósiles calcáreos, que típicamente tienen menos de 5µm de diámetro. El resto de la muestra se lavó

completamente usando una malla estándar número 230 (con orificios de 62 μ m de diámetro) para remover las partículas de arcilla y limo. Después, la fracción de arena se drenó a través de papel filtro y se desecó.

Cuando ambas porciones de cada muestra estuvieron completamente secas, se siguió uno de los dos siguientes procedimientos:

1. Procedimiento para nanofósiles calcáreos. Del fondo del vaso de laboratorio se raspó una cantidad muy pequeña del residuo desecado de la solución sobrenadante y se colocó en un portaobjeto de cristal de 1 mm de espesor para microscopio. Sobre este sedimento se pusieron tres o cuatro gotas de fijador Caedax (bálsamo del Canadá sintético), se tapó con un cubreobjeto de vidrio, se colocó en una hornilla y se dejó calentar hasta la ebullición durante varios minutos. Este procedimiento une el cubreobjeto con el portaobjeto y fija el sedimento y sus inclusiones. El examen de estas platinas se efectuó con un microscopio petrográfico Zeiss de luz transmitida, usando lentes secos y de inmersión en aceite. Las fotografías de los nanofósiles calcáreos se tomaron con un microscopio similar que tenía una cámara adjunta.

2. Procedimiento para microfósiles calcáreos más grandes. Después del secado se cribó cada muestra a través de una serie de mallas de número 18, 40, 80 y 140, con orificios de 1 mm, 425 μ m, 180 μ m y 105 μ m, respectivamente. Cada fracción del sedimento se examinó en pequeñas cantidades bajo el microscopio (apenas lo suficiente para abarcar completamente el fondo de una bandeja estándar de 45 cuadros). Los microscopios empleados fueron un microscopio biopetrográfico de luz AO/Spencer y un estereomicroscopio biopetrográfico de luz Zeiss. Se examinaron fracciones progresivamente menores hasta que se observó toda la muestra y se removió cualquier fósil encontrado con una escobilla número cero. Los fósiles se colocaron en portaobjetos estándar con una perforación para fauna paleontológica, donde se mantuvieron hasta su identificación.

ANÁLISIS DE MICROFAUNA Y MICROFLORA

En el Cuadro 1 se enumeran los microfósiles encontrados en diversas muestras. Numerosas muestras no contenían fósiles, y en general eran las que estaban constituidas principalmente por el material gris y denso de lutita o esquisto, aunque en el caso de 0473-567 m (pozo 0-473, 567 m de profundidad) se encontraron

ostrácodos incrustados en la lutita. Los grupos fósiles más abundantes fueron ostrácodos y nanoplancton calcáreo (en forma de cocolitos); se encontraron foraminíferos en sólo 6 de las 59 muestras examinadas. Se encontraron pequeñas cantidades de otros grupos, como moluscos, insectos y partes óseas de peces. También se encontró material vegetal (véase el Cuadro 2).

Foraminíferos

Los foraminíferos son miembros del fílum Protozoa, clase Sarcodina, y en esencia son amibas que secretan complejas cápsulas cálcareas (testas) o que construyen una testa aglutinada mediante un cemento orgánico segregado (Loeblich y Tappan, 1964). En el primer análisis de las muestras sólo se encontró uno o dos foraminíferos. Esta escasez era difícilmente comprensible ya que varias muestras eran arenas muy finas que contenían otros microfósiles calcáreos y se suponía que también presentarían foraminíferos. El estudio de Merriam y Bandy (1965) proporcionó una explicación, pues describieron especímenes cretáceos reubicados pequeños (100 a 200 μ m) y quizás jóvenes (con sólo una o dos cámaras) procedentes de los sedimentos arenosos de la región. Al reexaminar las muestras arenosas de Cerro Prieto (en particular la fracción final) bajo la potencia mayor del microscopio (100 X), observamos foraminíferos muy pequeños de tamaño similar. En las muestras M8-694 m, M11-470 m y M38-372 m se encontraron foraminíferos plánticos cretáceos con relleno amarillo, como los ejemplos mostrados en las Figuras 4 y 5. En las muestras M11-351 m, M11-470 m y M38-480 m también se identificó una especie marina terciaria, Cassigerinella, cf. C. chipolensis (Cushman y Ponton) (Figura 6). Sin embargo, no fue posible identificar otros foraminíferos muy pequeños, y no sabemos si son cretácicos o terciarios, ni si son del bentos o del plancton (Douglas, 1979, comunicación personal). Se intentó establecer su identidad, pero el tamaño extremadamente pequeño de los especímenes imposibilitó una identificación positiva; además, algunos pueden ser individuos jóvenes, factor que complica tal identificación. En el Cuadro 3 se enumeran los foraminíferos identificados con certeza en las seis muestras que contenían foraminíferos (Figuras 4, 5 y 6).

Nanoplancton calcáreo

Los cocolitos son los restos del esqueleto de miembros de la clase Haptophyceae de algas. En el Cuadro 1 se enumeran las muestras que contenían

cocolitos. Las muestras Prián-3495 m, M6-1245 m y 0473-1434 m presentaron especies fácilmente identificables. La mayoría de las muestras contenía especies cretáceas reubicadas, tales como Watznaueria barneseae Perch-Nielson, pero se observaron pocos nanofósiles terciarios, entre ellos de la especie Discoaster y esfenolitos (Cuadro 4).

Ostrácodos

Los ostrácodos pertenecen al Arthropoda, clase Crustacea, y son pequeños organismos en forma de camarón que secretan una concha bivalva denominada carapacho, que es la parte del animal que puede fosilizarse. Los ostrácodos mudan esta envoltura varias veces durante su vida, y éstas etapas de "crisálida" también se preservan en la crónica geológica a través de la fosilización de los diversos carapachos (Pokorny, 1978). En la identificación de las especies individuales se usan diversos criterios complejos que incluyen el tipo de charnela que articula las dos valvas, las superficies de inserción muscular y las estructuras en los bordes de las valvas.

Numerosas muestras de Cerro Prieto contenían valvas de ostrácodos o fragmentos (Cuadro 1 y 2). Los especímenes tienen conchas lisas y delgadas, sin gran ornamentación, lo que indica que provienen de un medio de agua marina o salina de baja energía. Los poros, los bordes y las superficies internas de las valvas están bien preservados, lo que señala que los especímenes no son muy antiguos; en realidad, los ostrácodos encontrados en las muestras, aunque no se haya identificado su género o especie, parecen ser del holoceno (McRaney, 1979, comunicación personal).

INTERPRETACION DE LOS DATOS

Las muestras de Cerro Prieto presentan varios problemas; los más evidentes son la contaminación aparente por la perforación y la alteración hidrotérmica.

El primer problema está representado por la presencia de ostrácodos en todos los niveles de los pozos. Aunque en realidad se espera y es razonable su presencia en muestras obtenidas a poca profundidad (M38-372 m, M38-480 m, M11-138 m), los ostrácodos en muestras profundas (M38-969 m, Prián-3243 m, Prián-3495 m) indican un desplazamiento descendente demasiado grande que no puede explicarse mediante la reubicación natural de los sedimentos. Este fenómeno también puede observarse entre los nanofósiles calcáreos cuando las muestras someras (M11-470 m) contienen especímenes cretáceos

y las muestras profundas (0473-1434 m) presentan formas terciarias. Dado que los nanofósiles son sumamente pequeños, es natural que sean transportados y reubicados con facilidad; sin embargo, el grado de desplazamiento de estas muestras parece deberse a la recirculación del lodo durante las operaciones de perforación. En la preparación de muestras en el laboratorio se tuvo mucho cuidado para evitar la contaminación al efectuar ese procedimiento.

En las muestras existen tan pocos foraminíferos que es difícil deducir conclusiones a partir de ellos. La ambigüedad sistemática de esos especímenes tan pequeños impide que ayuden en la identificación de la edad o el paleoambiente del campo de Cerro Prieto, y no nos permite formar una idea respecto a esos factores. El tamaño similar de todos los especímenes pequeños indica que fueron transportados y colocados selectivamente en su posición. Los tres o cuatro foraminíferos del bentos que encontramos están muy mal preservados y no podemos elaborar una hipótesis relativa a su paleoambiente. La incapacidad para identificar los especímenes pequeños también nos impide asignar una edad a las muestras.

Por lo tanto, los ostrácodos constituyen quizás el mejor indicador de las condiciones ambientales del área, ya que son abundantes y están bien conservados. Como se señaló anteriormente, la morfología de su concha es típica de los ostrácodos de medios de agua marina o salina, por lo que es razonable proponer que podrían indicar condiciones de facies de laguna o estuario.

Los sedimentos del Río Colorado existentes en el norte del Golfo de California se depositaron sobre todo durante una elevación del nivel del mar posterior al pleistoceno. Actualmente, el área casi no es deposicional, y los sedimentos que quedaron en la región norte del golfo son sedimentos residuales (Van Andel, 1964). Merriam y Bandy (1965) clasificaron como sedimentos de "delta reciente" a las muestras recolectadas cerca del área de Cerro Prieto. Los foraminíferos cretáceos reubicados que se encontraron en la muestra probablemente provienen de la lutita de Mancos altamente fosilífera del cretáceo superior que existe en la Mesa del Colorado por donde fluye el Río Colorado (Merriam y Bandy, 1965).

Los especímenes marinos de mediados del terciario pertenecientes a Cassigerinella chipolensis encontrados en los pozos M-38 y M-11 a profundidades de 350 a 500 m podrían tener gran importancia

geológica. Estos foraminíferos no son contaminantes de laboratorio y hasta ahora no se han identificado en muestras del lodo de perforación o en las presas de lodo cercanas a los pozos. En la depresión Salton no se conocen afloramientos o unidades subsuperficiales de donde puedan provenir estos microfósiles. Su edad (aproximadamente 15 millones de años) sobrepasa muchísimo a la de cualquier muestra estudiada de la depresión Salton y del Golfo de California. Deberían realizarse estudios adicionales en recortes de pozo de Cerro Prieto con objeto de buscar un conjunto de estos especímenes. Si se confirma la presencia de Cassigerinella chipolensis, tal descubrimiento influirá en las teorías actuales acerca de la formación del Golfo de California y de la historia de la costa del Pacífico a mediados del terciario.

NOTA DE AGRADECIMIENTO

Deseamos agradecer al Dr. Robert G. Douglas del Department of Geological Sciences, University of Southern California, y al Dr. James Ingle, Jr. de Stanford University, su asistencia en el examen de los foraminíferos; al Dr. Merton Hill, III, de la Union Oil Company Research Division, Brea, California, su examen de los nanofósiles calcáreos; y al Sr. John McRaney del Department of Geological Sciences, University of Southern California, su examen de los ostrácodos. El equipo fotográfico fue proporcionado por el Dr. Robert Osborne del Department of Geological Sciences, y la asistencia fue suministrada por Robert C. Scheidemann, Jr., ambos de la University of Southern California. Agradecemos especialmente a nuestros colegas mexicanos de Cerro Prieto la recolección de las muestras y que nos proporcionaran un modelo geológico preliminar del campo.

El estudio se realizó bajo los auspicios del U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, bajo el contrato W-7045-ENG-48.

La cita de un nombre de compañía o producto no implica que la Universidad de California o el Departamento de Energía aprueben o recomienden el producto excluyendo otros que también puedan ser adecuados.

FIGURAS

Fig. 1. Mapa de localización del campo geotérmico de Cerro Prieto en México, al sur de la depresión Salton.

Fig. 2. Pozos geotérmicos usados en el micropaleontológico (dentro de los círculos).

Fig. 3. Perfil geológico simplificado de la porción de desarrollo más antiguo del campo geotérmico de Cerro Prieto (de Vonder Haar y Puente C., 1979a).

Fig. 4. Hedbergella holmdelensis (de Sliter, 1968). Foraminífero cretáceo reubicado procedente de la Mesa del Colorado y encontrado en los sedimentos deltáicos del pozo M-11. El tamaño real de cada foraminífero es de 0.15 mm.

Fig. 5. Heterohelix globulosa (de Sliter, 1968). Foraminífero cretáceo reubicado procedente de la Mesa del Colorado y encontrado en el pozo M-8. El tamaño real de cada foraminífero es de aproximadamente 0.25 mm.

Fig. 6. Dos vistas del foraminífero terciario Cassigerinella chipolensis (Stainforth et al., 1975) encontrado en recortes de pozo de Cerro Prieto. Estas fotografías tomadas con microscopio electrónico de exploración fueron proporcionadas por J.L. Lamb, EXXON Production Research, Houston, Texas. El tamaño real del foraminífero es de 1.0 mm.

CUADROS

Cuadro 1. Lista de comprobación de microfósiles de Cerro Prieto por pozo geotérmico y profundidad de la muestra.

Cuadro 2. Lista completa de fragmentos de concha y otros restos orgánicos en las muestras estudiadas de pozos geotérmicos de Cerro Prieto.

Cuadro 3. Foraminíferos identificados con certeza en las muestras de pozos de Cerro Prieto.