

MICROFOSSILS FROM CERRO PRIETO GEOTHERMAL WELLS, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Mary Lou Cotton
Department of Geological Sciences
University of Southern California
Los Angeles, California

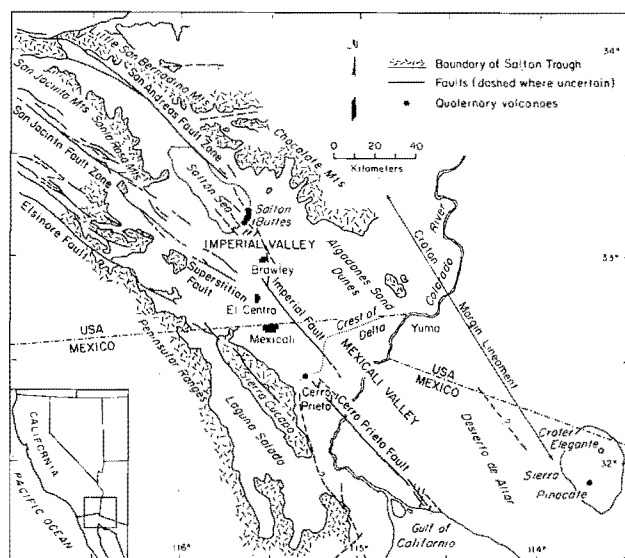
Stephen Vonder Haar
Earth Sciences Division
Lawrence Berkeley Laboratory
Berkeley, California 94720

ABSTRACT

To aid in a paleoenvironmental and age reconstruction of the Cerro Prieto reservoir system, we analyzed 59 samples of well cuttings for microfossils. The cuttings were obtained at depths from 351 to 3495 m in 14 geothermal wells in the Cerro Prieto field, Baja California, Mexico. We found foraminifera in 6 samples, ostracodes in 19 samples, and nannoplankton 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 500 m 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 3495 m 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, Mexico.

In general, the geology at Cerro Prieto consists of a mixed deltaic environment (Fig. 3) in the southern Salton Trough (Puente 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 Puente C., 1979a, b).

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 a given well. For those not familiar with microfossils, an excellent general overview is given by Haq and Boersma (1978).

LABORATORY PROCEDURES

All samples were soaked in water before washing. Initial attempts to break down 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 densified, 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 analyze calcareous nannofossils, which are typically smaller than 5 μm in diameter. The remainder of 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 beaker 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 standard 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.

MICROFAUNAL AND FLORAL ANALYSIS

Table 1 lists the microfossils encountered in various

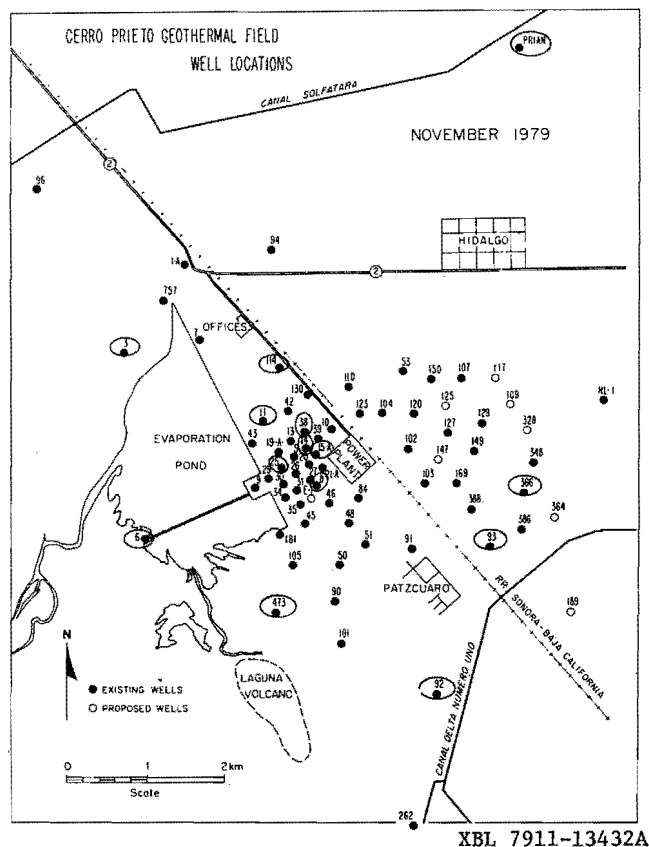


Figure 2. Geothermal wells that were used in the micropaleontology study (circled).

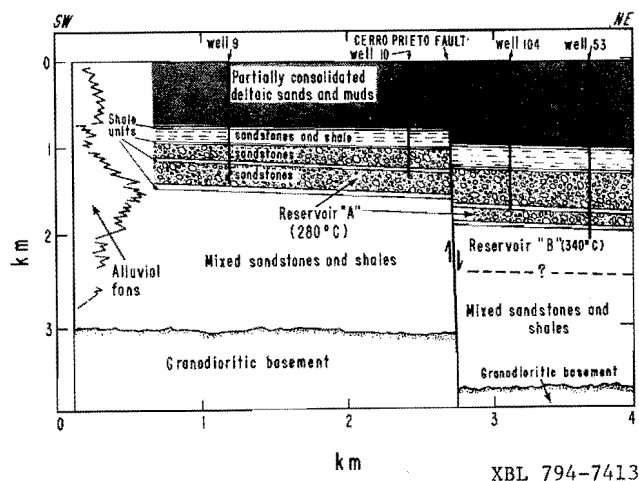


Figure 3. Simplified geologic section across the earliest developed portion of the Cerro Prieto geothermal field (from Vonder Haar and Puente C., 1979a).

samples. Many of the samples were barren; these tended to be the samples composed mainly of the gray dense shale or slate material, although for 0473-567 m, (well 0-473, at 567-m depth), ostracodes were found imbedded

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

Well	Sample depth (m)	Fora- minifer	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				

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 molluscs, 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 μm), 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 (100 X), we observed very small foraminifera of similar size. Yellow-filled Cretaceous planktic foraminifera were found in samples M8 — 694 m, M11 — 470 m, and M38 — 372 m. 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 — 351 m, M11 — 470 m, and M38 — 480 m. 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 individuals 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 Prian — 3495 m, M6 — 1245 m, and O473 — 1434 m. 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 se-

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			
			M92	1998	N
M8	964	O, F		2202	N
	906	N		2446	N
	1167	N, I			
	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	O473	567	N, O
	1041	N		804	B
	1254	B		1062	O
				1434	N
M15	693	O, N, F			
	1008	N	Prian	3243	O
	1164	B		3495	O, N
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

crete 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 (Pokorny, 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 the wells. Although their presence in shallow samples (such as M38 - 372 m, M38 - 480 m, M11- 138 m) is certainly expected and reasonable, in deep samples (M38-969 m, Prian-3243 m, and Prian-3495 m) 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 nannofossils, when shallow samples (M11-470 m) contain Cretaceous specimens, and deep samples Tertiary forms (0473-1434 m). 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 paleo-environment 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 cannot form a hypothesis about their paleoenvironment. Our inability to identify the small individuals also prevents us from assigning an age to the samples.

The ostracodes are, therefore, perhaps the best indicators of environmental conditions in the area, since they are abundant and well preserved. As noted above, their shell morphology is typical of ostracodes from marine or brackish water environments; it is not unreasonable to propose that they may indicate lagoonal or estuarine conditions.

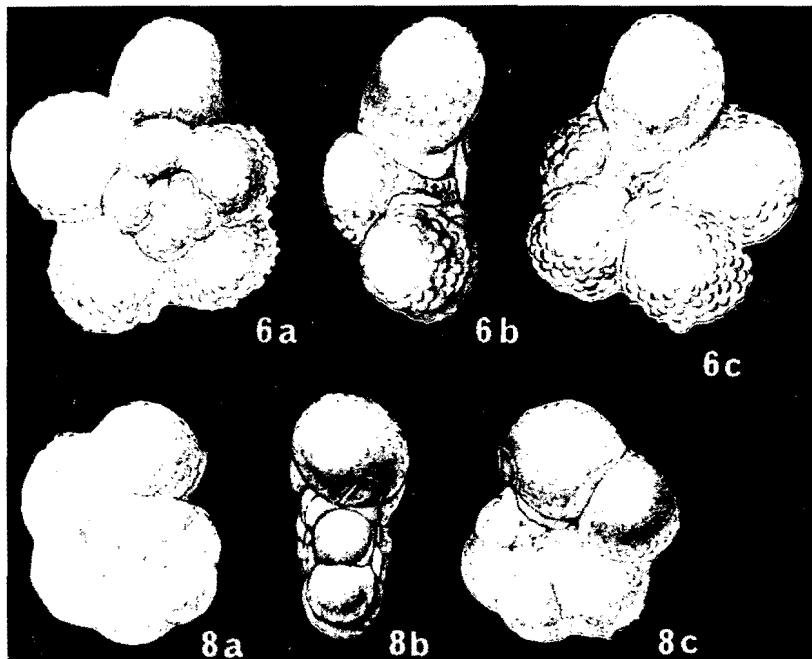


Figure 4. *Hedbergella holmdelensis* (from Sliter, 1968). A reworked Cretaceous foraminifer from the Colorado Plateau found in the deltaic sediments of well M-11. Actual size of each foraminifer is 0.15 mm.

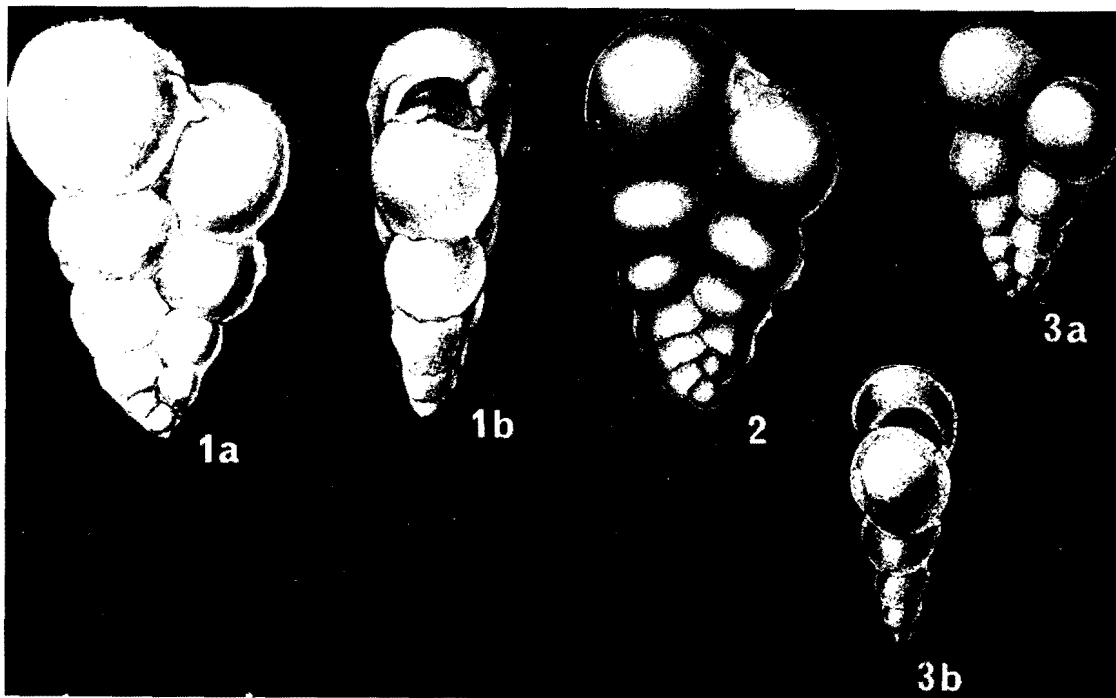


Figure 5. *Heterohelix globulosa* (from Sliter, 1968). A reworked Cretaceous foraminifer from the Colorado Plateau found in well M-8. Actual size of each foraminifer is approximately 0.25 mm.

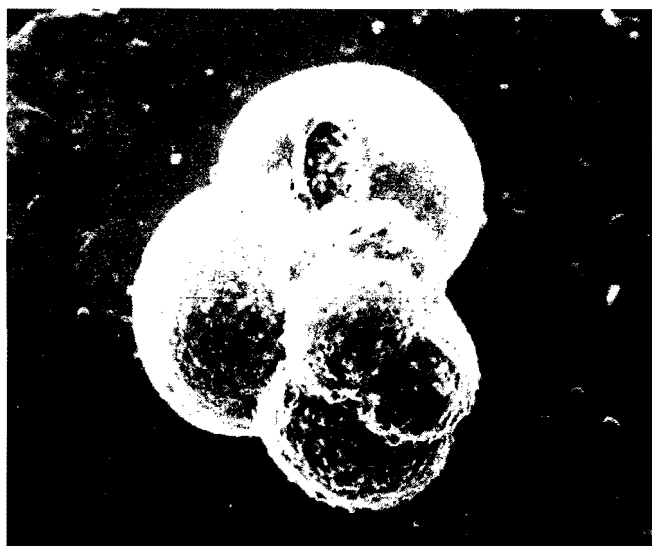
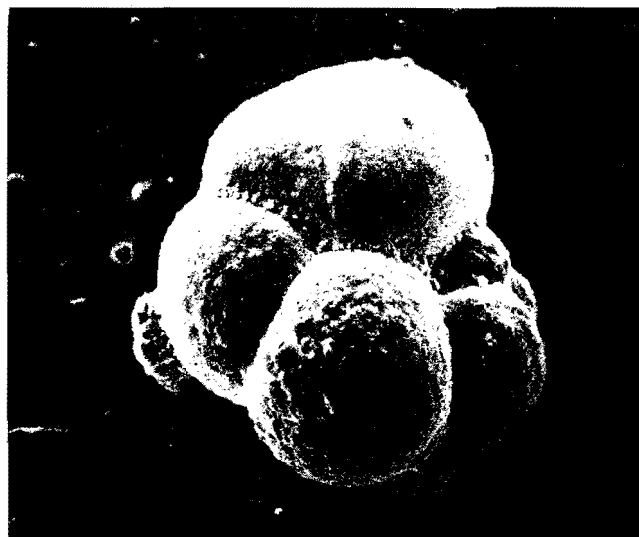


Figure 6. Two views of the Tertiary foraminifer *Cassigerinella chipolensis* (Stainforth et al., 1975) found in the Cerro Prieto well cuttings. These scanning electron microphotographs were provided by J. L. Lamb, EXXON Production Research, Houston, Texas. Actual size of the foraminifers is 1.0 mm.

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).

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

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

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

TABLE 4. NANNOPLANKTON OBSERVED IN CERRO PRIETO WELL CUTTINGS

Well	Depth (m)	Nannoplankton Found
M6	1245	<i>Zygodiscus diplogrammus</i> Gartner <i>Lithraphadites carniolensis</i> Deflandre <i>Tranolithus</i> sp. <i>Watznaueria barneseae</i> Perch-Nielsen <i>Vagalapilla</i> sp. <i>Eifellithus turriseifelli</i> Deflandre <i>E. eximius</i> Perch-Nielsen
M11	470	<i>Nannoconus multicaudus</i> Deflandre and Deflandre-Rignaud <i>W. barneseae</i>
M92	2466	<i>Micula</i> sp. cf. <i>M. staurophora</i>
O473	1434	<i>Discoaster</i> sp. cf. <i>D. deflandrei</i> Bramlette and Riedel base of sphenolith
Prian	3495	<i>W. barneseae</i>

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

Mid-Tertiary marine *Cassigerinella chipolensis* in wells M-38 and M-11 at depths of 350 to 500 m 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 known outcrops or subsurface units in the Salton Trough from which this microfossil could have been reworked. Their age (approximately 15 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 assistance in examining the foraminifera; Dr. Merton Hill, III, of the Union Oil Company Research Division, Brea, California, for his examination of the calcareous nannofossils; and Mr. John Mc Raney 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 Dr. Robert C. Sheidemann 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 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.

REFERENCES CITED

- Bramlette, M., and Sullivan, F., 1961, Coccolithophorids 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: *Palaeontographica, Abt. B.*, v. 156 no. 4-6, p. 103-179.
- Howard, J. H., et al., 1979, Geothermal resource and reservoir investigations 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 field trips: Amer. Assoc. Pet. Geol. SEPM, SEG Pacific Sec., pp. 121-138.
- Loeblich, A., and Tappan, H., eds., 1964, *Protista, Sarcodina—chiefly Theamoebians and Foraminiferida*: Geol. Soc. Amer., 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., Mañon 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, Mexico: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7001, 14 p.
- Pokorny, 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, Mexico, September 1978*: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 17-37.
- Sliter, W. V., 1968, Upper Cretaceous foraminifera from southern California and northwestern Baja California, Mexico: 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, Mexico: *Trans. Geothermal Resources Council*, v. 3, p. 761-764.
- . 1979b, Transform faulting related to geothermal energy in Baja California, Mexico: *Geological Society of America, Abst. and Program*, v. 11, no. 7, p. 533.

ALGUNOS MICROFOSILES CALCAREOS DEL AREA DE CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA

RESUMEN

Con el fin de ayudar a la reconstrucción del paleoambiente y edad del sistema de yacimientos de Cerro Prieto, se analizaron, en la búsqueda de microfósiles, 59 muestras de recortes de pozos. Los recortes se obtuvieron de 14 pozos geotérmicos del campo de Cerro Prieto, entre 351 y 3495 m de profundidad. Encontramos foraminíferos en 6 muestras, ostrácodos en 19 muestras y nanoplancton (cocolitos) en 24 muestras. Ocasionalmente, se hallaron otros grupos tales como moluscos, insectos, partes de esqueletos de peces y materiales de plantas. Actualmente, no pueden realizarse interpretaciones detalladas debido a la mala preservación de las muestras. Esto se debe principalmente a dos causas: disolución por fluidos geotérmicos que llegan a 350°C de temperatura, y por la gran mezcla durante la perforación de formas cretácicas rellenadas (redepositadas de la región de la Meseta de Colorado) con especies terciarias. Será necesario hacer estudios adicionales de ostrácodos y foraminíferos de las partes más frías de los pozos. La abundancia y buena preservación de los ostrácodos indican ambientes marinos o de aguas salobres que en parte corresponden a facies de albuferas o estuarinas. La presencia del foraminífero marino *Cassigerinella chipolensis* del Terciario Medio (15 millones de años atrás) en los pozos M-11 y M-38, a 350 y 500 m de profundidad, es poco clara. Estos ejemplares no se deben a contaminación en el laboratorio y, hasta ahora, no se los ha encontrado en el lodo de perforación. Si otros estudios confirman su presencia en Cerro Prieto, las ideas arraigadas sobre la apertura del Golfo de California y sobre la historia de la Costa del Pacífico en el Terciario Medio deberán modificarse.

INTRODUCCION

El propósito de este estudio fue examinar todo microfósil presente en muestras del subsuelo del campo geotérmico de Cerro Prieto (Fig. 1), y de correlacionar los fósiles con una gama de edad y paleoambiente. De los 55 pozos del campo, se seleccionaron 14 pozos que incluían una gama de pozos de exploración y producción (la ubicación de los pozos se muestra en la Fig. 2). Algunos pozos, como el Prian, se seleccionaron por sus aguas frías (100°C) en comparación con los fluidos de los yacimientos geotérmicos (350°C). Las muestras de recortes de perforación se recogieron de las unidades de la capa sello, del yacimiento principal y de las intercalaciones de lutitas y limolitas, entre 351 y 3495 m de profundidad.

En general, la geología de Cerro Prieto consta de un ambiente deltaico mixto (Fig. 3) en la parte meridional de la Depresión del Salton (Puente C. y de la Peña L., 1979; Noble *et al.*, 1977), siendo ésta similar a la del campo geotérmico de East Mesa, 60 km al norte (Howard *et al.*, 1979). Sin embargo, aparentemente Cerro Prieto tiene mayor influencia marina del Golfo de California que East Mesa. El campo geotérmico de Cerro Prieto se fractura en un rasgo estructural principal, la falla de Cerro Prieto, que lo bisecta (Vonder Haar y Puente C., 1979a, b).

Para evitar en lo posible toda contaminación, se utilizaron reconocidas técnicas micropaleontológicas de laboratorio. Al principio se consideró que las muestras representaban los niveles sedimentarios y estratigráficos de los que se obtuvieron en los pozos. Para aquellos que no estén familiarizados con microfósiles, Haq y Boersm (1978) proporcionan un excelente resumen.

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Todas las muestras se remojaron en agua antes de lavarse. Inicialmente se intentó disgregar las lutitas y pizarras densificadas con querosene, pero el método no dio resultados satisfactorios y se abandonó. Después de remojar las muestras, las que no estaban completamente disgregadas —especialmente aquellas con alto contenido de arcilla y limo— se hirvieron sobre una placa caliente aproximadamente 15 minutos. Todas las muestras, con excepción de las rocas altamente densificadas, se disgregaron con facilidad.

Una pequeña fracción de la solución sobrenadante de cada muestra se extrajo antes del lavado, se colocó en un vaso de precipitados y se secó. Esta fracción es la que se utilizó para buscar los nanofósiles calcáreos, que típicamente tienen diámetros menores de 5 μ m. El resto de la muestra se lavó completamente a través de un tamiz estándar numero 230 (aberturas de 62 μ m de diámetro) para eliminar las partículas de tamaño limo y arcilla. Luego la fracción arena se drenó a través de un papel filtro y se secó.

Una vez que ambas porciones de cada muestra estaban completamente secas, se realizó uno de los siguientes procedimientos:

1. Procedimiento para nanofósiles calcáreos: Una muy pequeña parte del residuo seco se raspó del fondo del

vaso de precipitados en el cual se secó la solución sobrenadante, se colocó sobre un portaobjeto de vidrio para microscopio, de 1 mm de espesor. Sobre dicho sedimento se pusieron tres o cuatro gotas de fijador Caedax (un bálsamo de Canadá sintético), se cubrió con un cubreobjeto de vidrio, y se colocó el portaobjeto sobre una placa caliente para que hirviera varios minutos. Este procedimiento une al cubreobjeto con el portaobjeto y fija en su sitio al sedimento y sus inclusiones. El examen de estos preparados se realizó con un microscopio petrográfico Zeiss con luz transmitida, se usaron lentes secas y sumergidas en aceite. Fotografías de los nanofósiles calcáreos se obtuvieron por medio de un microscopio similar con una cámara acoplada.

2. Procedimiento para microfósiles calcáreos más grandes: Después de secada cada muestra se cribó a través de una serie de tamices: número 18 (aberturas de 1 mm), número 40 (aberturas de 425 μ m), número 80 (aberturas de 180 μ m) y número 140 (aberturas de 105 μ m). Pequeñas cantidades de cada fracción del sedimento se examinaron bajo el microscopio (sólo la cantidad suficiente para cubrir completamente el fondo de una bandeja cuadrada estándar 45, de escogimiento). Se utilizó un microscopio biopetrográfico AO/Spenser de luz y un esteromicroscopio biopetrográfico Zeiss de luz. Se examinaron fracciones progresivamente más finas hasta observar toda la muestra. Todo fósil encontrado se extrajo con un pincel de escogimiento número 0. Los fósiles se colocaron en bandejas micropaleontológicas estándar para faunas, de un solo agujero, donde se los mantuvo hasta su identificación.

ANÁLISIS DE MICROFAUNA Y FLORA

En la tabla 1 se da una lista de los microfósiles encontrados en varias muestras. En muchas de las muestras, especialmente en las correspondientes a densas lutitas y pizarras verdes, no se encontraron fósiles. Sin embargo, en O473-567 m (pozo O473 a 567 m de profundidad) se encontraron ostrácodos en lutitas. Los ostrácodos y el nanoplancton calcáreo (como cocolitos) fueron los grupos fósiles más abundantes. Se hallaron foraminíferos sólo en seis de las 59 muestras examinadas. Otros grupos, tales como moluscos, insectos y partes de esqueletos de peces se encontraron en pequeñas cantidades. También se hallaron algunos materiales de plantas (véase la Tabla 2).

FORAMINÍFEROS

Los foraminíferos son miembros del phylum *Protozoa*, clase *Sarcodina*. Esencialmente son amebas que segregan elaboradas conchas calcáreas (cónchulas) o que construyen cónchulas aglutinadas al segregar un cemento orgánico (Loeblich y Tappan, 1964). En el primer análisis de las muestras sólo se encontraron uno o dos foraminíferos. Esta escasez resultó difícil de explicar debido

a que varias muestras son arenas muy finas que contienen otros nanofósiles calcáreos, en las que se podría esperar encontrar foraminíferos. El estudio de Merriam y Bandy (1965) da una explicación, describe pequeños ejemplares redepositados del Cretácico, quizás juveniles (con sólo una o dos cámaras), en los sedimentos arenosos de la región. Al reexaminar las muestras arenosas de Cerro Prieto (especialmente la fracción fina) bajo el máximo poder del microscopio (100 X), se observaron foraminíferos muy pequeños de tamaño similar; se encontraron foraminíferos planctónicos, amarillos y rellenados del Cretácico en las muestras M8-694 m M11-470 m, y M38-372 m. En las figuras 4 y 5 se muestran ejemplos de este tipo de foraminíferos. También se identificó una especie marina terciaria, *Cassigerinella* sp. cf. *C. chipolensis* (Cushman y Ponton), (Fig. 6), en las muestras M11-351 m, M11-470 m, y M38-480 m. Sin embargo, otros foraminíferos más pequeños no pudieron identificarse. No se sabe si son del Cretácico o del Terciario, bentónicos o planctónicos (Douglas, 1979, comunicación personal). Se trató de identificarlos, pero el tamaño extremadamente pequeño de los ejemplares imposibilitó su positiva identificación. En la tabla 3 se presenta la lista de foraminíferos identificados con cierta certidumbre en las seis muestras que contenían foraminíferos (Figs. 4, 5, y 6).

NANOPLANKTON CALCAREO

Los cocolitos son restos de esqueletos de algas de la clase *Haptophyceae*. En la tabla 1 se indican las muestras que contienen cocolitos. Especies que se identifican con facilidad se encontraron en las muestras Prian-3495 m, M6-1245 m, y O473-1434 m. La mayoría de las muestras contenían especies cretácicas redepositadas, tal como *Watznaueri barneseae* Perch-Nielson. También se observaron unos cuantos nanofósiles terciarios, tales como discoasters y esfenolitos (Tabla 4).

OSTRACODOS

Los ostrácodos pertenecen al phylum *Arthropoda*, clase *Crustacea*. Son pequeños organismos, semejantes a camarones, que segregan conchas bivalvas llamadas caparazones. Estos caparazones son las partes del animal fosilizadas. A lo largo de su vida los ostrácodos mudan varias veces de caparazón, y estas etapas o "mudas" también se preservan en el registro geológico al fosilizarse los varios caparazones (Pokorny, 1978). Para identificar las especies individuales se utilizan criterios complejos: el tipo de charnela que articula las dos valvas, las cicatrices en los lugares donde se ligaban los músculos y las estructuras de las márgenes de las valvas.

Muchas de las muestras del área de Cerro Prieto contenían valvas o fragmentos de ostrácodos (Tablas 1 y 2). Los ejemplares tienen conchas suaves y delgadas, sin gran ornamentación, lo que indica que provienen de un ambiente marino o de aguas salobres de baja energía; los

poros, márgenes y superficies internas están bien conservados, lo que significa que dichos ejemplares no son muy antiguos. De hecho, los ostrácodos encontrados en las muestras, aunque no se identificó su género o su especie, parecen ser del Holoceno (McRaney, 1979, comunicación oral).

INTERPRETACION DE LOS DATOS

Existen varios problemas en las muestras del área de Cerro Prieto. El más obvio es la aparente contaminación durante la perforación y la alteración hidrotérmica.

El primer problema se evidencia en la presencia de ostrácodos en todos los niveles de los pozos. Aunque la presencia de ostrácodos es lógica en muestras superficiales (tales como M38-372 m, M38-480 m, M11-138 m), en las muestras más profundas (M38-969 m, Prian-3243 m, y Prian-3495 m) los ostrácodos indican un desplazamiento descendente tan grande que no puede explicarse por la redeposición natural de los sedimentos. Este fenómeno también puede observarse en los nanofósiles calcáreos, cuando muestras superficiales (M11-470 m) contienen ejemplares del Cretácico y muestras profundas (O473-1434 m) formas del Terciario. Debido a que los nanofósiles son extremadamente pequeños, se transportan y redepositan con facilidad. Sin embargo, en estas muestras el grado de desplazamiento parece deberse a la recirculación de lodo durante las operaciones de perforación. En el trabajo de laboratorio se tomaron grandes precauciones para evitar contaminaciones.

Debido a que hay tan pocos foraminíferos en las muestras, es difícil sacar conclusiones. La sistemática ambigüedad de especímenes tan pequeños los limita como herramienta para determinar la edad o el paleoambiente del campo de Cerro Prieto, lo que impide llegar a conclusiones al respecto. El hecho de que todos los ejemplares pequeños son de tamaño similar indica que el viento los transportó y depositó. Los tres o cuatro foraminíferos béticos que se encontraron están mal preservados y no podemos hacer ninguna hipótesis sobre su paleoambiente. Al no poder identificar los ejemplares pequeños tampoco podemos asignar las edades de las muestras.

Por consiguiente, los ostrácodos debido a su abundancia y buena preservación son quizás los mejores indicadores de las condiciones paleoambientales en el área. Como se indicó más arriba, la morfología de sus conchas es típica de ostrácodos de ambientes marinos o de aguas salobres. No es lógico proponer que ellos puedan indicar condiciones de albuferas o de estuario.

Los sedimentos del Río Colorado en el norte del Golfo de California, en gran parte, se depositaron durante una elevación del nivel del mar posterior al Pleistoceno. En la actualidad, en gran parte del área no hay deposi-

ción y los sedimentos en la parte norte de la región del golfo son sedimentos "relictos" (van Andel, 1964). Merriam y Bandy (1965) clasificaron varias muestras tomadas cerca del área de Cerro Prieto como sedimentos de "delta reciente". Los foraminíferos cretácicos redepositados que se hallaron en las muestras, probablemente provienen de la lutita Mancos del Cretácico Superior, rica en fósiles, de la Meseta de Colorado, a través de la cual fluye el Río Colorado (Merriam y Bandy, 1965).

La *Cassigerinella chipolensis* marina del Terciario Medio de los pozos M-38 y M-11 de 350 a 500 m de profundidad, es de gran importancia geológica. Estos foraminíferos no son contaminantes de laboratorio, y no se han observado aún en las muestras de lodo de perforación y en los fodos de lodo cercanos a los pozos. En la Depresión del Salton no se conocen afloramientos o unidades del subsuelo en las que pudiera haberse redepositado este microfósil. Su edad (aproximadamente 15 millones de años) es mucho mayor que las informadas para muestras de la Depresión del Salton y del Golfo de California. Se deberían realizar estudios complementarios de recortes de pozos de Cerro Prieto para buscar un grupo de ejemplares. Si se confirmara la presencia de *Cassigerinella chipolensis*, se alterarían las presentes teorías sobre la apertura del Golfo de California y sobre la historia de la costa del Pacífico en el Terciario Medio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer al doctor Robert G. Douglas, del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Southern California, y al doctor James Ingle, Jr., de la Universidad de Stanford, por su asistencia en el examen de los foraminíferos; al doctor Merton Hill, III, de la Union Oil Company Research Division, Brea, California, por su examen de los nanofósiles calcáreos; y al señor John McRaney, del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Southern California, por su examen de los ostrácodos. Las instalaciones y equipo fotográfico las facilitó el doctor Robert Osborne, del Departamento de Ciencias Geológicas, con la ayuda de Robert C. Scheidemann, Jr., ambos de la Universidad de Southern California. Se agradece especialmente a los colegas mexicanos de Cerro Prieto por coleccionar las muestras y por facilitar un modelo geológico preliminar del campo.

Este trabajo se llevó a cabo bajo los auspicios del Departamento de Energía de Estados Unidos, División de Energía Geotérmica, bajo contrato W-7045-ENG-48.

La mención de nombres de compañías y productos no implica la aprobación o recomendación del producto, excluyendo otros que puedan resultar adecuados, por parte de la Universidad de California o del Departamento de Energía de Estados Unidos.

TITULOS DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Mapa de localización del campo geotérmico de Cerro Prieto en la parte meridional de la Depresión del Salton, México.

- Figura 2. Pozos geotérmicos utilizados en el estudio micropaleontológico (indicados con un óvalo).
- Figura 3. Sección geológica simplificada de la parte inicialmente desarrollada del campo geotérmico de Cerro Prieto (de Vonder Haar y Puente, C., 1979a).
- Figura 4. *Hedbergella holmdelensis* (de Sliter, 1968). Un foraminífero redepositado del Cretácico de la Meseta de Colorado encontrado en los sedimentos deltaicos del pozo M-11. El tamaño real de cada foraminífero es de 0.15 mm.
- Figura 5. *Heterohelix globulosa* (de Sliter, 1968). Foraminífero redepositado del Cretácico de la Meseta de Colorado encontrado en el pozo M-8. El tamaño real de cada foraminífero es de 0.25 mm.
- Figura 6. Dos vistas del foraminífero Terciario *Cassigerinella*

chipolensis (Stainforth *et al.*, 1975) encontrado en recortes de pozos de Cerro Prieto. Estas fotografías se tomaron con un microscopio electrónico de barrido, las proporcionó J. L. Lamb, EXXON Production Research, Houston, Texas. El tamaño real de los foraminíferos es de 1.0 mm.

- Tabla 1. Lista de microfósiles de Cerro Prieto, por pozo geotérmico y profundidad de la muestra.
- Tabla 2. Lista completa de fragmentos de conchas y otros restos orgánicos estudiados en muestras de pozos geotérmicos de Cerro Prieto.
- Tabla 3. Foraminíferos identificados con certeza en muestras de pozos de Cerro Prieto.
- Tabla 4. Nanoplankton observado en recortes de pozos de Cerro Prieto.