

DATING THERMAL EVENTS AT CERRO PRIETO USING FISSION TRACK ANNEALING

S. J. Sanford and W. A. Elders
Institute of Geophysics and Planetary Physics
University of California
Riverside, California, U.S.A.

Abstract

We have estimated the duration of heating in the Cerro Prieto reservoir by relating the fading of spontaneous fission tracks in detrital apatite to observed temperatures. The rate of fading is a function of both time and temperature. The apparent fission track age of the detrital apatites then, is a function of both their source age and their time-temperature history.

Data from laboratory experiments and geologic fading studies were compiled from published sources to produce lines of iso-annealing for apatite in time-temperature space. Fission track ages were calculated for samples from two wells at Cerro Prieto, one with an apparently simple and one with an apparently complex thermal history. Temperatures were estimated by empirical vitrinite reflectance geothermometry, fluid inclusion homogenization and oxygen isotope equilibrium. These estimates were compared with logs of measured borehole temperatures.

The temperature in well T-366, where complete annealing first occurs, was estimated to be between 160° and 180°C. Complete annealing at these temperatures requires 10^4 and 10^3 years, respectively.

Well M-94 has an apparently complex thermal history. Geothermometers in this well indicate temperatures some 50° to 100°C higher than those measured directly in the borehole.

Fission tracks are partially preserved in M-94 where paleotemperatures were as high as 200°C and are erased where geothermometers indicate temperatures of 250°C. This implies a thermal event less than 10^1 years and greater than 10^0 years in duration.

Introduction

Spontaneous fission tracks are damage trails created in insulating solids by the passage of highly ionizing fission fragments from the natural decay by fission of ^{238}U (Fleischer and others, 1965a). The fission track age of a mineral is a function of the amount of fission damage in a mineral, its uranium content and the rate of decay of ^{238}U (Price and Walker, 1963; Fleischer and others, 1975).

Fission tracks are thermally unstable and are gradually erased by heating (Fleischer and others, 1965b). If heating is of sufficient duration and intensity, fission tracks can be completely erased. This process of annealing has been well character-

ized for the mineral apatite both in the laboratory (Naeser and Faul, 1969; Wagner and Reimer, 1972; Märk and others, 1973) and in geologic situations (Naeser and Forbes, 1976; Briggs and others, 1979) as a process whose rate is dependent upon time and temperature. Figure 1 shows this relationship for apatite. Different degrees of track fading from isothermal laboratory experiments are extrapolated to times comparable with those in studies of annealing in geologic situations.

The mathematical treatment of the relationship of annealing time and temperature, which allows the extrapolations to be made, was performed by Zimmerman and Gaines (1978). The reason for the slight offset of the geologic data from the extrapolation of the data from laboratory studies is that fading taking place over much longer periods of time is slow enough to allow new fission tracks to form. The parallelism of the extrapolation of laboratory data with the trend defined by geologic data indicates that the fading process, which is believed to be diffusion controlled (Fleischer and others, 1965a), is the same for both long and short periods of time.

Apatite is a fairly ubiquitous detrital mineral in the sandstones of Cerro Prieto. Two wells which were believed to have different thermal histories and for which suitable sandstone samples existed, were chosen for detailed study.

Fission Track Annealing in Well T-366

Detrital apatites were separated from drill cuttings of nine depth intervals in well T-366 in the eastern part of the field (Figure 2). Ages were calculated for each grain, a necessity in dating sediments, and were found to range rather widely at temperatures lower than those which would anneal fission tracks. This is a result of the heterogeneous nature of the source terrain and the analytical uncertainty in calculating individual grain ages (Figure 3).

Temperatures in well T-366 were estimated by means of an empirical vitrinite reflectance geothermometer (Barker, 1979; Barker and Elders, 1979), fluid inclusions, oxygen isotopes and borehole temperature logs (Figure 4). The slight discrepancy between temperatures determined by geothermometry and by direct measurement may be due to the disturbance of the thermal regime in the bore by flowing the well before the temperature log was made.

Between 2150 and 2350 m in T-366 the oxygen isotope geothermometer indicates a temperature

reversal. The change in thermal gradient exhibited by the vitrinite reflectance geothermometer and temperature log at 2100 m implies that any complexity in the thermal history of the bore is below that depth. The agreement of the geothermometers above 2100 m indicates temperatures are prograde and at a maximum in the life of the geothermal field.

As is evident from the plot of fission track ages versus depth (Figure 3), annealing begins below 1517 m. Above this depth, the broken line in the figure defines an average apparent age for the source of the sediments of 157×10^6 yr. Muffler and Doe (1968) studied acid-insoluble residues of Colorado River sediments and reported a Pb-Pb age of 1700×10^6 and a Rb/Sr age of 500×10^6 yr. If we assume that the sediments at Cerro Prieto have the same source, this discrepancy suggests that thermal events on the Colorado Plateau have reset the fission track and isotopic apparent ages by different amounts.

Simple extrapolation of the trend of decreasing fission track age with depth, the method used in previous studies to determine depth of the first occurrence of complete annealing in a bore hole (Naeser and Forbes, 1976), indicated a temperature range for partial stability of fission tracks of nearly 100°C. The actual temperature range of partial stability of fission tracks in apatite is 40°C, shown by the horizontal distance between the lines representing 0% and 100% annealing on Figure 1. The wide range of fission track ages discussed above thus makes simple extrapolation an unacceptable approach for determining the depth of first occurrence of complete annealing.

Given the thermal gradient in the interval where annealing is observed in well T-366, the temperature range of partial stability of fission tracks of 40°C requires that the transition from complete retention to complete track erasure takes place within 120 m in this well. Using the temperature and corresponding depth range of partial stability of fission tracks as a guide, the maximum and minimum depth of the first occurrence of zero fission track age in T-366 was found to be between 1940 and 1980 m. These depths corresponded to temperatures between 160 and 180°C, respectively. Assuming heating to the final annealing temperature was instantaneous and conditions since then were isothermal, the times needed at these temperatures to completely erase fission tracks in apatite are 10^4 to 10^3 years, respectively.

It appears that the age of geothermal activity, at least the heating in well T-366, is similar to the age suggested for the most recent activity in the Cerro Prieto volcano by DeBoer (1979). He showed that geomagnetic paleopoles measured for a rhyodacite dike in the volcano fall near a 13,750-12,000 year old magnetic polar excursion. This similarity in ages may be only fortuitous as the well T-366 lies 8 km from the volcano.

Fission Track Annealing in Well M-94

Well M-94, on the northern edge of the field (Figure 2), has a complex thermal history, as witnessed by the difference between equilibrium bore

hole temperature logs and temperatures estimated by geothermometry (Figure 5). This discrepancy suggests that the geothermometers, which below 1300 m indicate temperatures some 50° to 100° higher than the temperature log, are recording an earlier transient heating event. The sudden jump shown by the vitrinite reflectance geothermometer at 1300 m is probably spurious. It occurs at a point in the well where a core was taken, wireline logs were run, and intermediate casing was set. It is likely that the cuttings representative of that critical interval were not caught when the driller circulated out before the coring run and wireline logging. Six apatite samples from the well were dated. Considerably more scatter was found in these ages (Figure 6) than in those from T-366, which also suggests a more complex thermal history. Spontaneous fission tracks are preserved at 1269 m, as indicated by a non-zero age for that depth, where fluid inclusions indicate a temperature of at least 200°C. For partial preservation of fission tracks at that temperature, heating could not last more than some tens of years. Complete annealing at 1292 m and 250°C requires only 10^0 years. An intense thermal event lasting less than 10^1 years and more than 10^0 years is thus indicated for this well at the northern edge of the field.

There are historical records of phreatic eruptions at Laguna Volcano (Figure 2) following major earthquakes in 1852 and 1915 (Anonymous, 1916; Woodward, 1956). Such phreatic eruptions suggest a process for rapid heating and cooling in the reservoir. Seismically induced fracturing could reduce pressure by escape of water and steam to the surface and thereby induce boiling in the formation. This would lead to the explosive rise of superheated steam and water through the fractures. Boiling in the formation would lead to the precipitation of calcite, sealing of the fractures and would ultimately stop the upward flow. The well M-94 contains abnormally high amounts of calcite between 1100 m and 1300 m at the same depth range where isotope and fluid inclusions geothermometers are closest to the boiling curve for a 2% NaCl solution.

Discussion

Given the rapid heating rates for Cerro Prieto found in this investigation, along with the water-rock mass ratio of three estimated for the system (Williams and Elders, 1981), a rapid rate of flow through the geothermal system is indicated. This is consistent with the work of Grant and others (1981) which indicates that extraction of geothermal fluid, rather than producing a two-phase zone in the reservoir, leads to the inflow of cold water. High permeabilities necessary for rapid fluid flow are also indicated by wireline log and petrophysical analysis of the altered and unaltered sediments at Cerro Prieto (Seamount, 1981).

Acknowledgements

The authors would like to thank Alan Williams for supplying oxygen isotope geothermometry data and Charles Barker for providing the vitrinite reflectance temperature data. Thanks are also due to the investigators at Lawrence Berkeley Labora-

tory and Comisión Federal de Electricidad de Mexico for their assistance in our cooperative investigation of Cerro Prieto. This work was supported by Department of Energy contract number 7100410 through Lawrence Berkeley Laboratory and by the Roland Blanchard endowed fellowship for economic mineralogy through the Department of Earth Sciences at the University of California, Riverside. This paper is UCR/IGPP report number 81/11 of the Institute of Geophysics and Planetary Physics at UCR. It is based upon a master's thesis by the senior author (Sanford, 1981).

References

- Anonymous, 1916, The earthquake at Volcano Lake, Mexico, November 20, 1915: *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 6, 181-184.
- Barker, C. E., 1979, Vitrinite reflectance in the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, Mexico: *Univ. of Calif., Riverside/Inst. of Geoph. and Planet. Phys. report 79/10*, (Master's thesis), 127 p.
- Barker, C. E. and Elders, W. A., 1979, Vitrinite reflectance geothermometry in the Cerro Prieto geothermal field: *Trans. Geothermal Resources Council*, 3, 27-30.
- Briggs, N. D., Naeser, C. W. and McCulloh, T. H., 1979, Thermal history of sedimentary basins by fission track dating: *Geol. Soc. Amer. Abstr. with Progs.*, 11, no. 7, 394.
- DeBoer, J., 1979, Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes volcanic domes in the northern part of the Gulf of California rhombochasm: *Proc. of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico*, 91-98.
- Doell, R. R., Dalrymple, G. B., Smith, R. L. and Bailey, R. A., 1968, Paleomagnetism, potassium-argon ages, and geology of rhyolites and associated rocks of the Valles Caldera, New Mexico: *in* Coats, R. R., Hay, R. L. and Anderson, C. A. (eds.), *Studies in Volcanology*: *Geol. Soc. Amer. Memoir* 116, 211-248.
- Fleischer, R. L., Price, P. B., and Walker, R. M., 1965(a), Ion explosion spike mechanism in formation of charged particle tracks in solids: *Jour. of Appl. Phys.*, 36, 3645-3652.
- Fleischer, R. L., Price, P. B., and Walker, R. M., 1965(b), Effects of temperature, pressure, and ionization on the formation and stability of fission tracks in minerals and glasses: *Jour. Geophys. Res.*, 70, 1497-1502.
- Fleischer, R. L., Price, P. B., and Walker, R., 1975, *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*; University of California Press, Berkeley, 605 p.
- Grant, M. A., Truesdell, A. H., and Mañón, C. J., 1981, Production induced boiling and cold water entry in the Cerro Prieto geothermal reservoir indicated by chemical and physical measurements: *Proc. of the Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico* (this volume).
- Haas, J. L., 1971, The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system: *Econ. Geol.*, 66, 940-946.
- Lanphere, M. A., Dalrymple, G. B. and Smith, R. L., 1975, K-Ar ages of Pleistocene rhyolitic volcanism in the Coso Range, California: *Geology*, 3, 329-341.
- Märk, E., Pahl, M., Purtscheller, F., and Märk, T. D., 1973, Thermische Ausheilung von Uran-Spaltspuren in Apatiten, Alterskorrekturen und Beiträge zur Geochronologie: *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 20, 131-154.
- Muffler, L. J. P. and Doe, B. R., 1968, Composition and mean age of detritus of the Colorado River delta in the Salton Trough, southeastern California: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 38, 384-399.
- Naeser, C. W., 1980, The fading of fission tracks in the geologic environment - data from deep drillholes (abstr.): *in* Bigazzi, G. (ed.), *Fission Track Workshop: Instituto di Geochronologia e Geochimica Isotopica, Pisa, Italy*.
- Naeser, C. W. and Faul, H., 1969, Fission track annealing in apatite and sphene: *Jour. Geophys. Res.*, 74, 705-710.
- Naeser, C. W. and Forbes, R. B., 1976, Variation of fission-track ages with depth in two deep drill holes: *EOS*, 57, 353.
- Price, P. B. and Walker, R. M., 1963, Fossil tracks of charged particles in mica and the age of minerals: *Jour. Geophys. Res.*, 68, 4847-4862.
- Reimer, G. M., 1972, *Fission track geochronology; Method for tectonic interpretation of apatite studies with examples from the central and southern Alps*: Unpublished Ph.D. Dissertation, University of Pennsylvania.
- Sanford, S. J., 1981, Dating thermal events at Cerro Prieto using fission track annealing: *Univ. of Calif., Riverside/Inst. of Geoph. and Planet. Phys. report 81/5*, (Master's thesis), 113 p.
- Seamount, D. T., Jr., 1981, Well log study of the hydrothermally altered sediments of the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: *Univ. of Calif., Riverside/Inst. of Geoph. and Planet. Phys. report 81/5*, (Master's thesis), 167 p.
- Wagner, G. A. and Reimer, G. M., 1972, Fission track tectonics: The tectonic interpretation of fission track apatite ages: *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 14, 263-268.
- Wasserburg, G. J., Eberlin, G. D., and Lanphere, M. A., 1962, Age of the Birch Creek schist

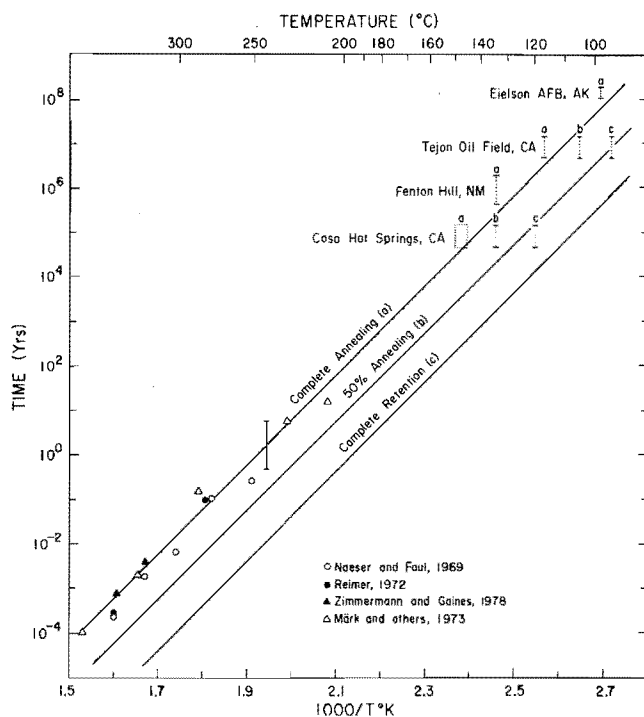
and some batholithic intrusions in Alaska: Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 73, 258-259.

Williams, A. E. and Elders, W. A., 1981, Oxygen isotope exchange in rocks and minerals from the Cerro Prieto geothermal system: Indicators of temperature distribution and fluid flow: Proc. of the Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico (this volume).

Woodward, A. (ed.), 1956, Journal of Lt. Thomas Sweeny 1849-1853, Westernlore Press, 278 p.

Ziegler, D. L. and Spotts, J. H., 1976, Reservoir and source bed history in the Great Valley, California; in Jantzen, R. E. (ed.), Tomorrow's oil from today's provinces: Amer. Assoc. Pet. Geol., Pac. Sec. misc. pub. 24, 19-38.

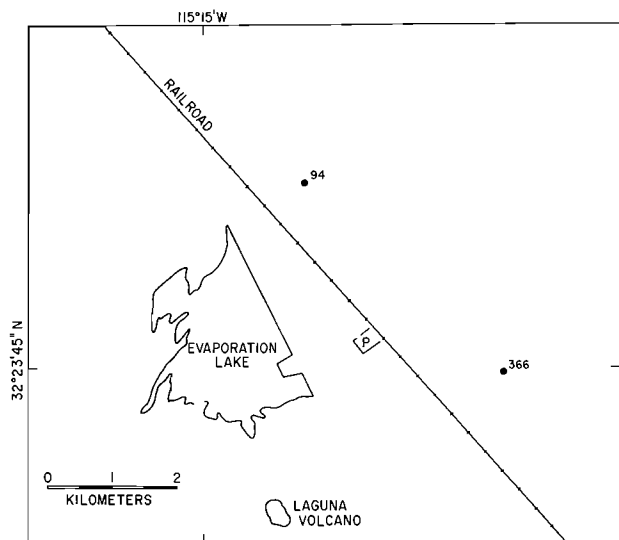
Zimmermann, R. A. and Gaines, A. M., 1978, A new approach to the study of fission track fading; in Zartman, R. E. (ed.), Short papers of the Fourth International Conference, Geochronology, Cosmochronology, Isotope Geology 1978: U.S. Geol. Survey open-file report 78-701, 467-468.



XBL 826-771

Figure 1. Compilation of time and temperature data for annealing of fission tracks in apatite. Solid lines represent extrapolation of data from laboratory experiments, indicated by circles and triangles. Solid vertical bar indicates 95% confidence interval for extrapolation. Dotted vertical bars indicate complete (a), 50% (b), and 0% (c) annealing for fission tracks in apatite in geologic situations where there is an independent estimate of the age of heating (Naeser, 1980). Height of vertical bars indicates possible range in age for the heating. Age ranges from Wasserburg and others (1962): Eilson AFB; Ziegler and Spotts (1976): Tejon Oil Field; Doell and others (1968): Fenton Hill; Lanphere and others (1975): Coso Hot Springs.

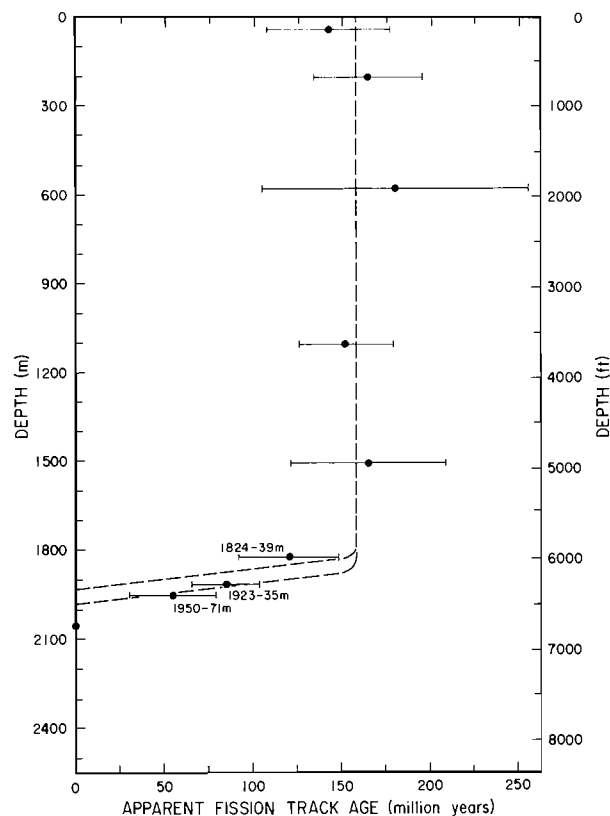
Figura 1. Recopilación de datos de tiempo y temperatura para el recocido de trazas de fisión en apatita. Las líneas representan la extrapolación de datos de experimentos de laboratorio (indicados por círculos y triángulos). Las barras verticales indican los intervalos de certeza del 95% para la extrapolación. Las líneas punteadas verticales indican el 100% (a), 50% (b), y 0% (c) de recocido de las trazas de fisión en apatita bajo condiciones geológicas donde existe una estimación independiente de la edad del calentamiento (Naeser, 1980). La altura de las barras verticales indica el posible intervalo de edades para el calentamiento. Los intervalos de edades son de Wasserburg et al. (1962): Eilson AFB; Ziegler y Spotts (1976): Tejon Oil Field; Doel et al., (1968): Fenton Hill; Lanphere et al., (1975): Coso Hot Springs.



XBL 826-734

Figure 2. Cerro Prieto geothermal field showing location of wells studied.

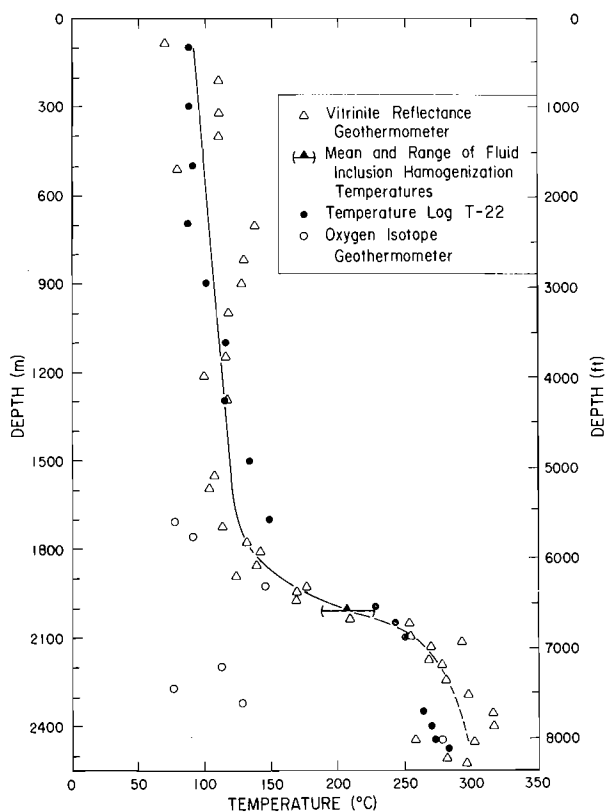
Figura 2. El campo geotérmico de Cerro Prieto, indicando la localización de los pozos estudiados.



XBL 826-735

Figure 3. Apparent fission track age with depth in well T-366. Vertical broken line indicates apparent source age: 157 m.y. Intersections of oblique broken lines with depth axis represent maximum and minimum depths for complete annealing of fission tracks in apatite. Error bars are ± 1 standard error of the mean.

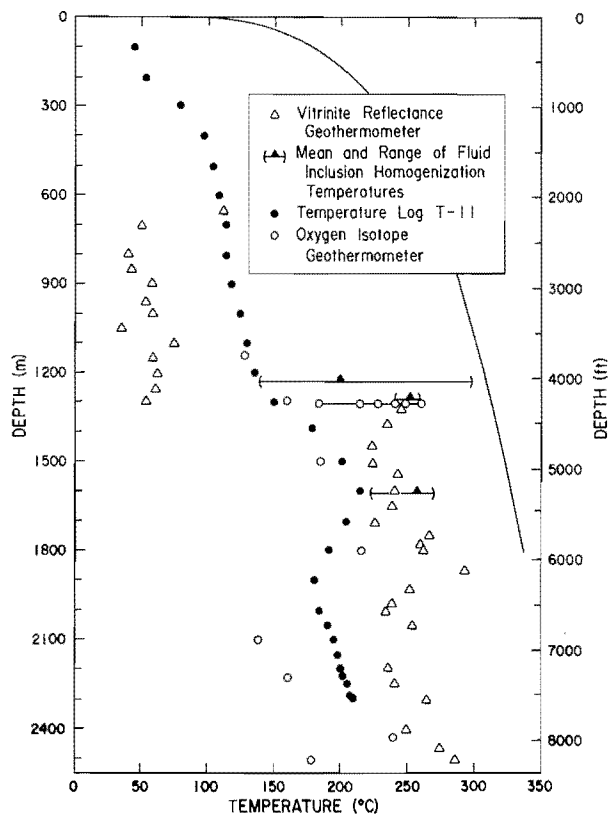
Figura 3. Edad aparente de las trazas de fisión vs. profundidad en el pozo T-366. La línea vertical de trazo discontinuo indica la edad aparente de la fuente: 157×10^6 años. Las intersecciones de las líneas oblicuas de trazo discontinuo con el eje de las profundidades representan la profundidad máxima y mínima para el recocido completo de las trazas de fisión en apatita. Las barras de erros son : un error estándar del promedio.



XBL 826-736

Figure 4. Temperature estimates for well T-366. Temperature estimates by vitrinite reflectance are unpublished data of Charles Barker. Temperature log T-22 was made under static well conditions and zero well-head pressure.

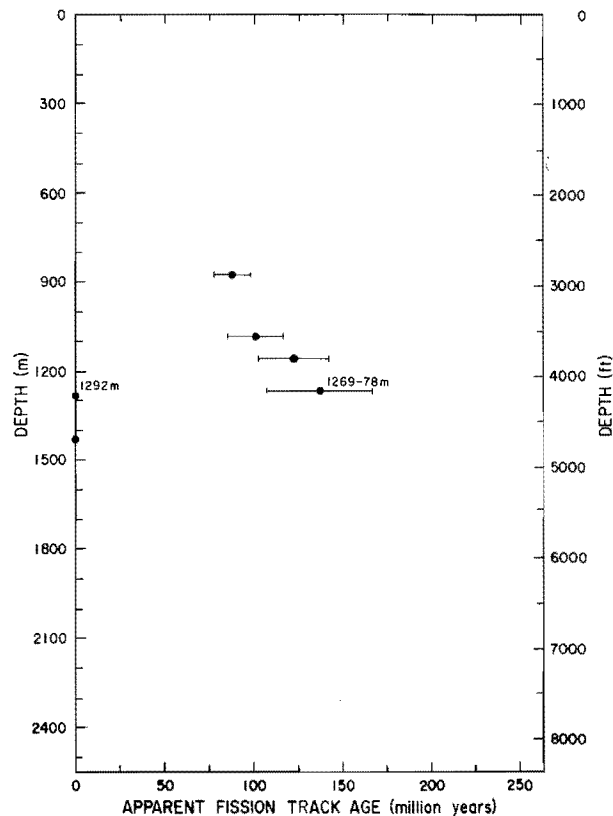
Figura 4. Estimaciones de temperaturas para el pozo T-366. Las estimaciones de temperatura basadas en reflectancia de vitrinita son datos de Charles Barker aún no publicados. El registro de temperaturas T-22 fue obtenido en el pozo bajo condiciones estáticas y una presión de cabezal igual a cero.



XBL 826-737

Figure 5. Temperature estimates for well M-94. Note discordance of temperatures estimated with geothermometry and borehole temperature measurements. Sudden jump in vitrinite temperatures (Barker, 1979) is probably an artifact of sampling. Temperature log T-11 was made under static conditions at zero well-head pressure. The curve shows the boiling point to depth relationship for a 2% NaCl-H₂O solution (Haas, 1971).

Figura 5. Estimaciones de temperatura para el pozo M-94. Nótese la discordancia entre las temperaturas estimadas mediante geotermometría y las medidas en el pozo. El súbito salto de temperaturas basadas en la vitrinita (Barker, 1979) se debe probablemente al muestreo. El registro de temperaturas T-11 se obtuvo bajo condiciones estáticas y una presión de cabezal igual a cero. La curva indica la relación entre el punto de ebullición y la profundidad para una solución de 2% de NaCl en agua (Eassay, 1971).



XBL 826-738

Figure 6. Apparent fission track age with depth, well M-94. Note sudden transition to zero age at 1292 m. Error bars are ± 1 standard error of the mean.

Figura 6. Edad aparente de las trazas de fisión vs. profundidad en el pozo M-94. Nótese la súbita transición a una edad igual a cero a 1292 m. Las barras de error son $\pm$ un error estándar del promedio.

DATACION DE EPISODIOS TERMALES EN CERRO PRIETO USANDO EL RECOCIDO DE TRAZAS DE FISIÓN

RESUMEN

Hemos estimado la duración del calentamiento del yacimiento de Cerro Prieto relacionando el desvanecimiento de trazas espontáneas de fisión en apatitas detríticas con las temperaturas observadas. La velocidad del desvanecimiento depende del tiempo y de la temperatura. Por lo tanto, la edad aparente de las trazas del fisión

en las apatitas detríticas es una función tanto de la edad de sus fuentes de origen, como de la variación de sus temperaturas con el tiempo.

Datos de experimentos de laboratorio y de estudios geológicos sobre el desvanecimiento de las trazas fueron compilados de la literatura técnica para elaborar líneas de igual recocido en el espacio tiempo-temperatura. Se calcularon las

edades de las trazas de fisión en muestras de dos pozos de Cerro Prieto, uno con una historia térmica aparentemente compleja. Las temperaturas fueron estimadas mediante geotermometría empírica de reflectancia de vitrinita, homogeneización de inclusiones fluidas, y equilibrio de isótopos de oxígeno. Estas estimaciones fueron comparadas con los registros de temperaturas medidos en los pozos.

La temperatura en el pozo T-366, donde primero aparece un recocido completo, se estimó entre 160° y 180° C. A estas temperaturas, el recocido completo requiere respectivamente 10^4 y 10^3 años.

El pozo M-94, tiene una historia térmica aparentemente compleja. Los geotermómetros indican temperaturas de 50° C a 100° C más altas que las medidas en el pozo.

En el pozo M-94, las trazas de fisión se conservan parcialmente en lugares donde la paleotemperatura alcanza hasta 200° C, y están borradas donde los geotermómetros indican temperaturas de 250° C. Esto sugiere un episodio termal de 10^0 a 10^1 años de duración.

INTRODUCCION

Las trazas de fisión espontánea son estelas de daño producidas en sólidos aislantes por el paso de fragmentos de fisión de alto poder de ionización producidos por la desintegración natural por fisión del ^{238}U (Fleischer et al., 1965a). La edad de las trazas de fisión de un mineral depende de la cantidad de daño por fisión en el mineral, de su contenido de uranio, y de la velocidad de desintegración del ^{238}U (Price y Walker, 1965; Fleischer et al., 1975).

Las trazas de fisión son termicamente inestables y son borradas gradualmente por calentamiento (Fleischer et al., 1965b). Si el calentamiento es de duración e intensidad suficiente, las trazas de fisión son borradas totalmente. Este proceso de recocido ha sido bien caracterizado para en el mineral apatita en el laboratorio (Naeser y Paul, 1969; Wagner y Reimer, 1972; Mark et al., 1973) y bajo condiciones geológicas (Naeser y Forbes, 1976; Briggs et al., 1979) como un proceso cuya velocidad depende del tiempo y de la temperatura. En la Figura 1 se muestra esta relación para la apatita. Diferentes grados de desvanecimiento de trazas obtenidos en experimentos isotérmicos en el laboratorio son extrapolados a tiempos comparables con aquellos establecidos en estudios de recocido bajo situaciones geológicas.

La relación matemática entre el tiempo de recocido y la temperatura que permite realizar dichas extrapolaciones fue desarrollada por Zimmerman y Gaines (1978). El pequeño desplazamiento entre los datos geológicos y los obtenidos al extrapolarse datos de estudios de laboratorio se debe a que el desvanecimiento, que ocurre a lo largo de períodos de tiempo mucho más largos, es suficientemente lento tal que permite la formación de nuevas trazas de fisión. El

paralelismo entre la extrapolación de datos de laboratorio y la tendencia definida por los datos geológicos indica que el proceso de desvanecimiento, que se cree controlado por difusión (Fleischer et al., 1956) es el mismo tanto para períodos de tiempo cortos y largos.

La apatita es un mineral detrítico bastante común en las areniscas de Cerro Prieto. Para este estudio detallado se eligieron dos pozos que se cree tienen historias térmicas diferentes, y de los cuales existen muestras adecuadas de las areniscas.

RECOCIDO DE TRAZAS DE FISION EN EL POZO T-366

Las apatitas detríticas fueron separadas de recortes de perforación provenientes de nueve intervalos de profundidad del pozo T-366, localizado en la parte oriental del campo (Figura 2). Se calcularon las edades de cada grano, lo que es necesario en la datación de sedimentos. Se encontró que las edades variaban ampliamente para temperaturas menores que aquellas a las que ocurre el recocido de las trazas de fisión. Esto se debe a la heterogeneidad del terreno donde se originan los sedimentos, y a la incertidumbre analítica en el cálculo de la edad de granos individuales (Figura 3).

Las temperaturas en el pozo T-366 fueron estimadas utilizando el geotermómetro empírico de reflectancia de vitrinita (Barker, 1979; Barker y Elders, 1979), inclusiones líquidas, isótopos de oxígeno, y registros de temperatura medidos en el pozo (Figura 4). La pequeña discrepancia entre las temperaturas determinadas por geotermometría y por mediciones directas podrían deberse a la modificación del régimen térmico en el pozo al fluir éste antes de que se obtuviera el registro de temperatura.

En el T-366, entre 2150 y 2350, m el geotermómetro basado en isótopos de oxígeno indica una inversión de temperatura. El cambio en el gradiente térmico a 2100 m, indicado por el geotermómetro de reflectancia de vitrinita y por los registros de temperatura, implica que cualquier complicación en la historia térmica del pozo ocurre debajo de dicha profundidad. La concordancia de los geotermómetros por encima de los 2100 m indica temperaturas progradadas, y que éstas están en un punto máximo en la vida del campo geotérmico.

El recocido parece comenzar debajo de los 1517 m (Figura 3). La aparente edad de la fuente es 157×10^6 años. La edad promedio por encima de los 1517 m es menor que la edad Pb-Pb de 1700×10^6 años, y que la edad Rb/Sr de 500×10^6 años determinada por Muffler y Doe (1968) para la fracción insoluble en ácido de los sedimentos del Rfo Colorado. Se propone que un episodio térmico en la meseta del Colorado, fuente de los sedimentos de la Depresión de Salton, reajustó levemente las edades istópicas de mayor estabilidad térmica.

La simple extrapolación de la disminución de la edad de las trazas de fisión con la profundidad, el método utilizado en estudios

anteriores para determinar la profundidad de la primera aparición de un recocido completo en un pozo (Naeser y Forbers, 1976), indicó para la estabilidad parcial de las trazas de fisión un intervalo de temperaturas de cerca de 100°C . El intervalo real de temperaturas para la estabilidad parcial de las trazas de fisión en apatita es 40°C , indicado en la Figura 1 por la distancia horizontal entre las líneas que representan 0% y 100% de recocido. Por lo tanto, el amplio intervalo de edades de las trazas de fisión presentado más arriba, indica que la simple extrapolación es un método inaceptable para determinar la profundidad de la primera aparición de un recocido completo.

Dado el gradiente térmico en el intervalo donde se observa el recocido en el pozo T-366, el intervalo de temperaturas de estabilidad parcial de las trazas de fisión de 40°C requiere que la transición de una retención completa a un borrado completo de las trazas ocurra en este pozo dentro de un intervalo de 120 m. Utilizando como guía la temperatura y el correspondiente intervalo de profundidad de la estabilidad parcial de las trazas de fisión, se encontró que en el pozo T-366 la profundidad máxima y mínima de la primera aparición de un edad cero de las trazas de fisión está entre 1940 y 1980 m. Estas profundidades corresponden a temperaturas entre 160°C y 180°C , respectivamente. Suponiendo que el calentamiento necesario para alcanzar la temperatura final de recocido fue instantáneo, y que desde entonces se han mantenido condiciones isotérmicas, los tiempos que a dichas temperaturas se necesitan para borrar completamente las trazas de fisión en las apatitas son respectivamente 10^4 a 10^3 años.

Parece que la edad de la actividad geotérmica, al menos en el calentamiento del pozo T-366, es similar a la edad sugerida por DeBoer (1979) para la actividad más reciente del volcán Cerro Prieto. El mostró que los paleopolos geomagnéticos medidos en un dique de riolita del volcán caen cerca de una excursión polar magnética de 13,750 a 12,000 años de edad. Esta semejanza en edades puede ser solamente fortuita ya que el pozo T-366 se encuentra a 8 km del volcán.

RECOCIDO DE TRAZAS DE FISIÓN EN EL POZO M-94

El pozo M-94, en el extremo norte del campo (Figura 2), tiene una historia térmica compleja, indicada por la diferencia entre los registros de temperatura de equilibrio medidos en el pozo y las temperaturas estimadas mediante geotermómetros (Figura 5). Esta discrepancia sugiere que los geotermómetros, que debajo de los 1300 m indican temperaturas de 50°C a 100°C más altas que las dadas por los registros, están registrando un anterior episodio transitorio de calentamiento. El súbito salto indicado a 1300 m por el geotermómetro de reflectancia de vitrinita probablemente sea espurio. Este aparece en el pozo en un lugar donde se obtuvo un núcleo, se corrieron registros eléctricos, y se instaló tubería intermedia. Es posible que los recortes que representan a este intervalo crítico no fueron recogidos cuando el perforista circuló fluidos en el pozo antes de cortar el núcleo y correr los registros eléctricos. Se dataron seis muestras de

apatita. Se encontró una dispersión considerablemente mayor en las edades de estas muestras (Figura 6) que en las del pozo T-366, lo que también sugiere una historia térmica más compleja. Las trazas de fisión espontánea se conservan a 1269 m, como lo indica la edad diferente de cero correspondiente a dicha profundidad, donde inclusiones fluidas indican una temperatura de por lo menos 200°C . Para conservar parcialmente trazas de fisión a dicha temperatura, el calentamiento no podría durar más de unas décadas. El recocido completo a 1292 m y 250°C solamente requiere 10^0 años. Por lo tanto, en este pozo localizado en el extremo norte del campo, hay evidencias de un intenso episodio termal que duró menos de 10^1 y más de 10^0 años.

Existen datos históricos sobre erupciones freáticas en la Laguna Volcano (Figura 2) asociadas con los importantes terremotos de 1852 y 1915 (anónimo, 1916; Woodward, 1956). Estas erupciones freáticas sugieren un proceso de rápido calentamiento y enfriamiento en el yacimiento. El fracturamiento inducido tectónicamente podría reducir la presión mediante el escape de vapor y agua a la superficie, y con eso inducir la ebullición en la formación. Esto produciría el ascenso explosivo de vapor y agua sobrecalentada a través de las fracturas. La ebullición en la formación resultaría en la precipitación de calcita que sellaría las fracturas, y que finalmente detendría el flujo ascendente. El pozo M-94 entre 1100 y 1300 m contiene cantidades de calcita anormalmente altas en el mismo intervalo de profundidad donde los geotermómetros basados en isótopos y en inclusiones fluidas indican las temperaturas más cercanas a la curva de ebullición para una solución de 2% de NaCl.

DISCUSION

Las rápidas velocidades de calentamiento determinadas en este estudio para Cerro Prieto, junto con las razones máscas agua-roca de 3:1 estimadas para el sistema (Williams y Elders, 1981, estas actas) indican un rápido flujo a través del sistema geotérmico. Esto concuerda con el trabajo de Grant et al., (1981), que indica que la extracción de fluidos geotérmicos más que la formación de una zona de dos fases en el yacimiento induce la entrada de agua fría. Las altas permeabilidades necesarias para un rápido flujo de fluidos también están indicadas por los registros eléctricos y por los análisis petrofísicos de los sedimentos alterados y no alterados de Cerro Prieto (Seamount, 1981).

AGRADECIMIENTO

Los autores quisieran agradecer a Alan Williams por los datos de geotermometría basados en isótopos de oxígeno, y a Charles Barker por los datos de temperatura obtenidos de la reflectancia de vitrinita. Se agradece también a los investigadores del Lawrence Berkeley Laboratory y de la Comisión Federal de Electricidad por su asistencia en nuestro estudio cooperativo de Cerro Prieto. Este trabajo fue auspiciado por el Departamento de Energía bajo contrato No. 7100410 a través del Lawrence Berkeley Laboratory, y por una beca de la Fundación Roland Blanchard para

mineralogía económica a través del Department of Earth Sciences de la Universidad de California, Riverside. Este trabajo es el informe UCR-IGPP 81/11 del Institute of Geophysics and Planetary

Physics de UCR. Este trabajo está basado en la tesis de maestría del primer autor (Sanford, 1981).