

27
8-23-82
CONF-810399-16

LBL-11967
CONF-810399



① I-4966
**THIRD SYMPOSIUM
ON THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD,
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**



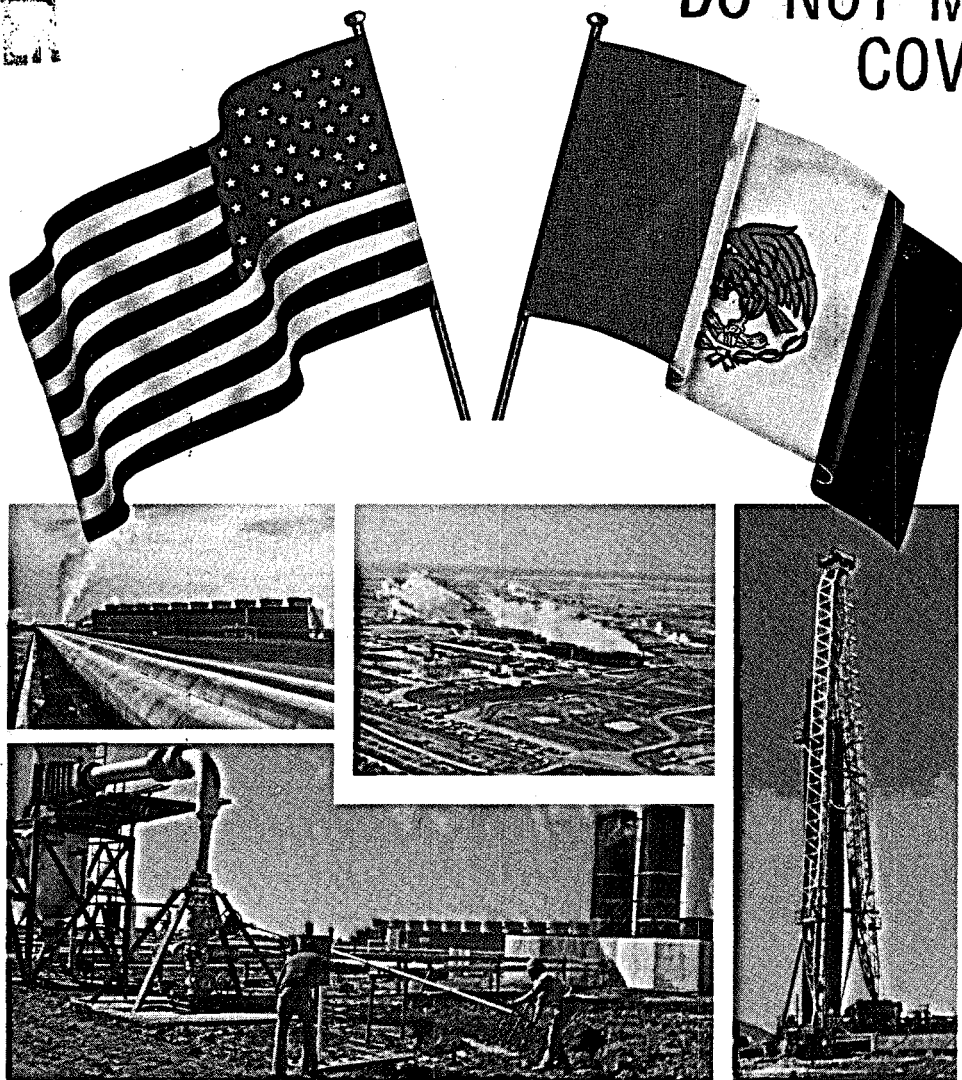
Sponsored by

United States Department of Energy, Office of Renewable Technology
Geothermal and Hydropower Technology Division

in Cooperation with
Comisión Federal de Electricidad de México

MASTER

DO NOT MICROFILM
COVER



PROCEEDINGS/ACTAS

March 24 - 26, 1981
San Francisco, California



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



Coordinadora Ejecutiva
de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California,
México

Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC03-76SF00098

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

RADON AND AMMONIA TRANSECTS ACROSS THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

L. Semprini and P. Kruger
Stanford University
Stanford, California, U.S.A.

ABSTRACT

Radon and ammonia transects, conducted at the Cerro Prieto geothermal field, involve measurement of concentration gradients at wells along lines of structural significance in the reservoir. Analysis of four transects showed radon concentrations ranging from 0.20 to 3.60 nCi/kg and ammonia concentrations from 17.6 to 59.3 mg/l. The data showed the lower concentrations in wells of lowest enthalpy fluid and the higher concentrations in wells of highest enthalpy fluid. Linear correlation analysis of the radon-enthalpy data indicated a strong relationship, with a marked influence by the two-phase conditions of the produced fluid. It appears that after phase separation in the reservoir, radon achieves radioactive equilibrium between fluid and rock, suggesting that the phase separation occurs well within the reservoir. A two-phase mixing model based on radon-enthalpy relations allows estimation of the fluid phase temperatures in the reservoir. Correlations of ammonia concentration with fluid enthalpy suggests an equilibrium partitioning model in which enrichment of ammonia correlates with higher enthalpy vapor.

INTRODUCTION

Radon and ammonia transects were conducted at the Cerro Prieto geothermal field to study flow and thermodynamic characteristics of the reservoir. The transect method, reported by Semprini and Kruger (1980), involves measurement of the concentration gradient of 3.83-day ^{222}Rn and stable NH_3 along a line of geothermal wells having structural significance in the reservoir. The combination of a radioactive, but chemically inert tracer, having a half-life commensurate with rate processes of interest and a non-radioactive, but chemically active component of the non-condensable gases, allows a two-tracer evaluation of the flow and thermodynamic characteristics of a geothermal reservoir.

Discussion of the use of radon in geothermal reservoir engineering was given by Kruger, Stoker, and Umaña (1977). The occurrence of radon in geofluids results from the decay of 1620-yr ^{226}Ra uniformly distributed in reservoir rock. Ammonia has excellent complementary properties as a reservoir tracer, although its occurrence in geothermal fluids is less clear. Allen and Day (1935) suggested a magmatic origin, whereas Facca and Tonani (1962) consider its origin from thermal degradation of sedimentary rock. Ammonia is quite soluble in water. Thus, its concentration in

produced geofluids should remain more constant compared to carbon dioxide (Ellis, 1962).

In this study, radon and ammonia were used to examine two-phase flow characteristics in the Cerro Prieto reservoir. With conservative tracers and concurrent flow of the two phases, wellhead concentrations are expected to remain constant after phase separation. However, radon (and probably ammonia) are continually added to the fluid along its travel path. Since the source term of these two gases and their partition coefficient in the two-phase fluid determine the ultimate wellhead concentration as functions of transit time and location in the reservoir, the observed concentration gradients of the two tracers should be related to the transport history in the reservoir.

RADON TRANSPORT IN GEOTHERMAL FLUIDS

Two processes govern the radon wellhead content of geofluids: (1) radon emanation into the geofluid from the reservoir rock; and (2) convective transport of the geofluid through the reservoir. The extent of radon emanation is given by the emanating power, defined as the fraction of radon produced that escapes to the pore fluid. Studies on radon emanation from rock were conducted by Andrews and Wood (1972), Barretto (1975), and Macias (1981), among others. Emanation was shown to be a function of rock type, particle size, fluid density, and temperature.

Equilibrium radon concentration is achieved in a geothermal pore fluid when the emanation rate into the fluid equals the rate of radioactive decay in the fluid. The equilibrium concentration of radon in a pore fluid may be estimated by the relationship given by Stoker and Kruger (1975) and D'Amore et al (1978):

$$C_s = \frac{Em \rho_r}{\phi \rho_f} \quad (1)$$

where C_s = mass concentration of radon in the pore fluid (nCi/kg)

Em = emanating power (nCi/kg)

ρ_r = rock density (kg/m^3)

ϕ = porosity

ρ_f = fluid density (kg/m^3)

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.

Warren and Kruger (1979) discussed the importance of the equilibrium radon mass concentration being inversely proportional to the fluid density. This relationship is directly related to the ratio of rock volume to fluid mass. For example, a steam-dominated reservoir and a liquid-dominated reservoir both at 240°C can have equivalent volumetric radon concentrations in the reservoir pore fluids. However, the radon mass concentration would be 50 times greater in the steam reservoir due to the density differences of saturated steam and water at this temperature.

Mathematical models that describe the build-up of radon in a geofluid with convective transport have been discussed by Stoker and Kruger (1975), D'Amore and Sabroux (1976), and Warren and Kruger (1979).

The radial flow model of Stoker and Kruger (1975) represents radon accumulation in a non-compressible fluid for horizontal flow to the wellbore through a reservoir of homogeneous porosity and uniform radium content. The radial flow geometry results from the well completely penetrating the producing reservoir. Warren (1980) extended the radial model to include an initial radon concentration in the pore fluid at the production boundary. In this system, the boundary represents a boiling interface. In a liquid system, this boundary may represent a re-injection area or boiling front in a two-phase system. The total concentration at the wellbore is given by the following equation:

$$C_T = C_B \exp \left[\frac{-\lambda \pi H \phi}{Q} (r_e^2 - r_w^2) \right] + \frac{E}{\phi \rho_f} \left[1 - \exp \left(\frac{-\lambda \pi H \phi}{Q} (r_e^2 - r_w^2) \right) \right] \quad (2)$$

where r_e = effective radius of the reservoir (m)

r_w = wellbore radius (m)

The effective pore volume of the reservoir is represented by the term, $\pi H \phi (r_e^2 - r_w^2)$, which divided by the volumetric flowrate, Q , is the residence time in the system. The $\frac{E}{\phi \rho_f}$ term represents the radon accumulated during transport from the boundary, while the C_B term represents the radon concentration at the boundary which undergoes radioactive decay transport.

In all-liquid flowing wells, radon produced at the wellhead is probably at its equilibrium concentration with respect to the reservoir rock, unless a large change in a reservoir property, such as rock type, occurs near the wellbore. Experiments by Macias (1981) indicate that emanation is not very dependent on pressure in a liquid system. Emanation should be almost constant along the path for an all-liquid system of homogeneous porosity and uniform radium content. For two-phase flow, the system is more complicated; the mobility of one phase may be greater than

the other. The phases may also have different residence times for radon build-up and decay, and radon exchange may occur between phases. Two transport models can be considered: (1) radial transport in which the two phases flow together to the wellbore, at the same or different velocities; (2) two-phase flow in which the liquid and vapor separate and enter wells at different production zones.

In these models, the equilibrium radon concentration of the two-phase fluid, C_T in (nCi/kg), may be represented by

$$C_T = x \frac{E \rho_v}{\phi \rho_v} + (1-x) \frac{E \rho_l}{\phi \rho_l} \quad (3)$$

where x = vapor phase mass fraction

$(1-x)$ = liquid phase mass fraction.

According to equation (3), the equilibrium radon concentration should be dependent on the fraction of steam and water flowing into the well. The enthalpy of the fluid at a given reservoir temperature is also dependent on the vapor and liquid mass fractions

$$h_f = x h_v + (1-x) h_l \quad (4)$$

where h_v and h_l are the enthalpies of the vapor and liquid phases, respectively. Equations (3) and (4) indicate that radon concentrations should be linearly related to enthalpy if equilibrium radon concentrations are approached in each phase.

Figure 1 shows the results of a set of model calculations for radial transport using equations (2) and (3) with radon concentration growing independently in the vapor and liquid phases after separation. The results show that the extent to which equilibrium is achieved is dependent on the distance between the wellbore and site of phase separation and the relative mobilities of each of the phases, which determines the transport time after phase separation. The three curves in the figure show the effect of varying the pore volume fraction occupied by the steam. When the volume fraction is small, steam is moving to the wellbore at a greater velocity than the water. When boiling occurs near the wellbore, all three curves indicate that the radon concentration of the two-phase fluid entering the wellbore is equal to the initial equilibrium concentration in the water. As the boiling front moves away from the well, the two phases reaching the wellbore approach the equilibrium concentration of the two-phase mixture. The results also show that as the fraction of steam in the pore space increases, the distance required for build-up to equilibrium concentration decreases. Thus, the model offers hope that the tracer measurements may be useful in determining the distance of a boiling front from a well and relative permeabilities in the reservoir.

AMMONIA TRANSPORT IN LIQUID AND TWO-PHASE RESERVOIRS

The ammonia concentration in two-phase fluids can also be used to determine if the two phases are flowing together to the wellbore, or if one phase is being produced preferentially. If ammonia is conserved during steady state transport of the two phases, the ammonia of the combined flow should be equal to the ammonia concentration of the original liquid. If the vapor phase on separation is produced in a different production zone, the ammonia concentration is expected to increase with increasing vapor content. Enrichment of ammonia may also occur when the two phases are flowing together, but not at steady-state conditions. For example, Ellis and Mahon (1977) observed positive correlations between gas content of the two-phase fluid and enthalpy in the Broadlands field in New Zealand, suggesting preferential vapor flow.

SAMPLING METHODS

Radon samples were obtained at Cerro Prieto from the steam phase at the cyclone separators. Analysis for radon concentration was made at the Stanford laboratories by the technique developed by Stoker and Kruger (1975). Mass balance measurements at the separators were made to determine the partitioning of radon between the steam and water phases. The radon content of the water phase was determined by a double extraction method in which the first analysis determines the total radon content of the sample, while a second analysis 30 days later determines the radium content of the water. The free radon concentration in the water at the time of cyclone separation may then be calculated using both radon measurements for the water. Results from the mass balance tests on four separators at Cerro Prieto found the mass fraction of radon in the water phase represents less than 1% of the total radon produced in the well. The radon concentration at the wellhead is calculated from the measured concentration in the steam phase and the measured steam and water mass flows.

Ammonia concentrations were measured in the steam and brine phases for 10 of the 20 wells in the transect experiments. The partition coefficients for ammonia were calculated from the measured concentrations. From the range of values of 5.3 to 8.6, an average partition coefficient of 6.6 was used to estimate ammonia concentrations in unsampled wells. Wellhead ammonia concentrations were determined by the mass balance method.

RESULTS

Results from two transect experiments at Cerro Prieto are given in Tables 1 and 2. Data in Table 1 are from the October 1979 test in which samples were collected from 10 wells. Eight of these wells were located along a transect line running from north to south across the main production zone. The two other wells were sampled normal to the transect.

The March 1980 transect test involved sampling of 15 wells, including four wells which were sampled in the October test. A schematic diagram of the field, giving the location of the wells sampled during each test is shown in Figure 2.

One noteworthy observation of the data in Tables 1 and 2 is that the enthalpy of the fluids in the overall transects ranged from 1231 to 2360 kJ/kg, representing fluids flowing from all liquid to approximately 73% vapor at an assumed reservoir temperature of 290°C. The corresponding radon concentration ranged from 0.20 nCi/kg to approximately 3.60 nCi/kg. Table 3 gives the average radon concentrations observed in the transects over various ranges of fluid enthalpy. In the two lowest enthalpy ranges 1230 to 1298 kJ/kg and 1300 to 1306 kJ/kg, the radon concentrations were fairly constant with average concentrations of 0.32 ± 0.07 nCi/kg and 0.31 ± 0.05 nCi/kg at respective average enthalpies of 1255 kJ/kg and 1303 kJ/kg. The fluid flowing from these low-enthalpy wells is predominantly liquid. The liquid phases should show more constant radon concentrations, since water density does not vary greatly with changes in temperature and pressure in the reservoir. As enthalpy increases, variations in radon concentration within an enthalpy range become greater. At an average enthalpy of 1361 kJ/kg, the average radon concentration was 0.35 ± 0.20 nCi/kg. The standard deviation of the average radon concentration increases as the enthalpy increases, corresponding to greater variations in concentration from well to well, probably caused by two-phase conditions in the higher enthalpy wells.

The increase in radon concentration with increase in enthalpy is especially apparent from the average results given in Table 3 for enthalpy values in the range of 1548 to 2210 kJ/kg, for which the average radon concentration increased from 0.58 to 2.13 nCi/kg.

Results of a linear regression analysis of radon concentration and enthalpy for both transect experiments are shown in Figure 3. The positive linear relationship with a correlation coefficient of 0.80 is influenced by the high radon concentrations in well M-45. The results from the regression analysis using average results from Table 3 are given in Table 4. The regression using average results is shown to have a greater slope and a higher correlation coefficient.

The predicted radon concentration for the linear radon-enthalpy relationship using equations (3) and (4) for reservoir temperatures of 270°C and 310°C are represented by the dashed lines in Figure 3. The volumetric equilibrium radon concentration of 146 nCi/m³ of reservoir pore volume used for the estimates was determined using the average radon concentration of 0.20 nCi/kg for all-liquid flowing wells in the low enthalpy range (1255 kJ/kg) and assuming radioactive equilibrium. The best-fit regression line for the enthalpy-radon relationship shown in Figure 3 corresponds to a reservoir temperature of 290°C. This temperature falls within the 270°C to 350°C range in reservoir temperatures

predicted by Mañon et al (1978) using the Na-Ca-K geothermometer.

The ammonia concentrations in the total well-head fluid show some degree of correlation to both radon concentration and fluid enthalpy. The lowest ammonia concentration of 17.6 mg/l was observed in well M-5, whose enthalpy of 1230 kJ/kg was the lowest observed. The highest ammonia concentration of 59.3 mg/l was in well M-45 that had the highest enthalpy content of 2360 kJ/kg. Average ammonia concentrations observed in various enthalpy ranges are given in Table 3. As noted for the radon data, average ammonia concentrations do not change greatly in the lower enthalpy ranges from 1230 to 1569 kJ/kg, but do increase with increasing enthalpy in the enthalpy range above 1569 kJ/kg.

Linear regression analyses were conducted for ammonia content in relation to radon content and ammonia content in relation to fluid enthalpy for all wells tested. Results of these analyses, given in Table 4, showed ammonia concentration positively correlated with radon concentration. Results from the enthalpy-ammonia regression analysis show a significant positive correlation of ammonia to enthalpy with a correlation coefficient of 0.80, a slope of 21.8 kJ/mg and y intercept of 833 kJ.

These correlations indicate that the ammonia concentration is also dependent on phase conditions in the reservoir. Results from the linear regression when average enthalpy and ammonia values are used, give a correlation coefficient of 0.96, a slope of 31.4 kJ/mg, and a y intercept of 543 kJ. The dependence of ammonia concentrations on phase conditions could result from either (1) the partitioning of ammonia between liquid and vapor phases; (2) the build-up of ammonia in liquid and vapor phases after phase separation, as ammonia emanates from the reservoir rock.

The possibility of the partitioning process for the relationship of ammonia concentration on phase conditions was further studied by phase equilibrium partitioning calculations for wells M-45, M-84, M-48, and M-51. It was assumed for these calculations that the ammonia concentration of 20 mg/l in low enthalpy wells represents the ammonia concentration in the liquid phase. The equilibrium ammonia concentration in the vapor phase of 80 mg/l was estimated from the liquid phase concentration of 20 mg/l and a value for the partition coefficient of 4.0, at a reservoir temperature of 290°C with assumed brine pH of 7.5.

Table 5 gives the results of these equilibrium partitioning calculations. The predicted ammonia concentrations are shown to match the measured concentrations with predicted values differing from actual measured values by less than 10%. These calculations indicate that ammonia is being partitioned between liquid and vapor phases and after phase separation, no additional ammonia is added to the fluid.

The partitioning to ammonia between liquid phases raises an important question. Does the

radon-enthalpy relationship result from partitioning of radon between vapor and liquid phases with variations in concentration, resulting from preferential production of either phase in a well? The data for equilibrium partitioning in Table 5 are based on an equilibrium radon concentration in the liquid phase of 0.20 nCi/kg. The equilibrium concentration in the vapor phase of 40 nCi/kg was estimated using a conservative value of a partition coefficient of 200 at a reservoir temperature of 290°C. Results in Table 5 show radon concentrations predicted from the equilibrium calculations are much higher than those actually measured. These results indicate that the radon concentration is more likely dependent on the build-up in radon concentration in both water and steam phases after phase separation, than from partitioning of radon between phases.

To investigate the variations in radon, ammonia and enthalpy contents of the fluids in more detail, four sub-transects in the field were constructed using results from the two transect experiments. Figure 2 showed the location of each of the transects. Figure 4 shows the enthalpy and radon and ammonia concentration profiles along each of the transect lines.

Transect A-B in Figure 2, which runs north-south, shows increases in all three components in well M-45 compared to other wells along the transect. The radon concentration in well M-45 is approximately 15 times greater than the wells directly north in the transect, while the ammonia concentration is only 2.5 times greater. The wells to the north, M-11 through M-31, are producing fluids that have low and very constant enthalpy, radon and ammonia content, indicating predominately liquid phase flowing conditions in this area of the reservoir. The abrupt change of all three components at well M-45 indicates a two-phase reservoir is located in that area of the field. Wells M-50 and M-90 which are located furthest south had lower radon and enthalpy contents than well M-45, indicating that the two-phase conditions decrease at the southern edge of the field.

Transect line A-D runs along a northwest-southeast line. The concentration profile shows corresponding increases in radon and enthalpy content in several wells, well M-27 having a higher radon concentration than those in adjacent wells. This may indicate local two-phase conditions in the area of well M-27. Well M-48 located in the southern central area showed larger values of all three components. The radon concentration in well M-48 was approximately 5 times greater than in well M-8, while the enthalpy content and ammonia concentrations were 1.28 and 1.17 times greater. A decrease in the radon, enthalpy and ammonia content was observed in well M-51, south of M-48. However, these values suggest that two-phase conditions still exist in this area of the reservoir.

The transect along the east-west line C-E shows an interesting radon-enthalpy relationship. Wells M-105 and M-103 at the ends of the transect have higher enthalpies but lower radon concentra-

tions compared to wells M-50, M-51, and M-91. These results could indicate higher fluid temperatures at the ends of the transect, with the phases produced having lower radon concentration but higher enthalpies.

Cross-section B-F which runs in a northeast-southwest direction, shows a similar trend. The radon-enthalpy contents gradually increase from wells M-90 to M-51, indicating a gradual increase in the vapor content of the flowing phase. The abrupt increase in radon concentration in well M-48, indicates an increase in vapor content. The radon concentration gradually decreases in wells M-84, M-102, and M-104, to the northeast, but the enthalpy of the fluids remains high. Well M-84 has a higher enthalpy than M-48. Cross-sections C-E and B-F suggest that wells towards the outer edges of the field may have a radon-enthalpy relationship different from those wells in the central area of the field, along transect lines A-B and A-D. Two possible explanations for the difference are: (1) the temperature of the fluids vary within the field with high temperatures in the areas of wells M-105, M-84, M-102 and M-104; (2) equilibrium radon concentrations are not achieved in the area of these wells.

Variations in field temperatures at the start of exploitation have been predicted using Na-K-Ca geothermometry (Mañon et al., 1978). In the northern-central part of the field along transect lines A-B and A-D, predicted temperatures ranged from 270 to 310°C. Wells in the eastern part of the field which includes wells M-102, M-103 and M-104, had higher predicted temperatures between 330°C and 350°C. The enthalpy-radon correlation shown in Figure 3 indicates the radon concentrations in these eastern wells may be linear correlated to enthalpy along a higher temperature line than those within the central area of the field.

The temperatures predicted from Na-K-Ca geothermometry in the southern area of the field are greater than those suggested by the radon-enthalpy relationship. Predicted temperatures for wells M-90, 51, 50, 48, 45, 84 range from 330 to 340°C. Radon-enthalpy relationship shown in Figure 3 predicts temperature in wells M-50, M-51, M-48, along the best-fit temperature of 280°C, while M-84 is nearer a predicted temperature of 320°C. If the radon-enthalpy correlation and its relationship to fluid temperature is correct, these results would suggest a decrease in temperatures in the southern area of the field with exploitation, while temperatures have remained high in the eastern section. It is also noted that greater amounts of fluid have been produced from the southern central area of the field, compared to the eastern section. Exploitation may have caused a drawdown in temperature from those originally predicted by Na-K-Ca geothermometry.

The variability in radon concentrations appears to be dependent on two-phase conditions in the reservoir. Deviations from a linear radon-enthalpy relationship could be caused by variations in fluid temperature within the reservoir.

Results indicate that the northern central area of the field flows predominately as a liquid phase, with evidence of two-phase conditions in the area of well M-27. In the southern central part of the field, a two-phase region exists in the areas of wells M-45, M-48, and M-84, with highest vapor/liquid ratios produced in well M-45. The ratio of vapor/liquid gradually decreases in wells further south. Wells on the northeast section of the field appear to be producing fluids from a higher temperature reservoir compared to the wells in the central area.

Deviations from the radon-enthalpy relationship appear to be more dependent on temperature variations within the field than on the non-attainment of radioactive equilibrium. If equilibrium radon concentrations are achieved in the wells, phase separation must be occurring away from the wellbore. Using the radial flow model given in equation (2), the radial distance of the boiling front to attain 95% of the equilibrium concentration can be estimated, e.g. for the flow conditions of well M-48. Well M-48 had estimated vapor and liquid flowrates in the reservoir of 43,000 kg/hr and 90,000 kg/hr respectively. To attain 95% of the equilibrium radon concentration, a retention time of 16.5 days is required. At the given liquid and vapor flowrates, in a 290°C reservoir with a porosity = 0.2 and a thickness = 200 m, the calculated pore volume is $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, corresponding to a radial boiling front at a distance of 62 m from the wellbore.

The assumption that equilibrium concentrations are achieved in the two-phase fluids suggests that phase separation is occurring away from the wellbore. The results from the transects do not prove equilibrium is achieved after phase separation. Radon concentrations dependence on phase conditions does indicate that after phase separation the residence time is long enough for radon to build up in both flowing phases.

NOMENCLATURE

- C_B = radon concentration leaving a boiling front (nCi/kg)
- C_s = mass concentration of radon in the pore fluid (nCi/kg)
- C_T = total radon concentration in the wellbore fluid (nCi/kg)
- E_m = emanating power (nCi/kg (rock))
- E = emanating power (nCi/m³ (rock))
- H = reservoir thickness (m)
- h_f = enthalpy of a two-phase mixture (kJ/kg)
- h_v = enthalpy of steam phase (kJ/kg)
- h_L = enthalpy of water phase (kJ/kg)
- Q = volumetric flowrate (m³/day)
- r_e = effective radius of the reservoir (m)
- r_w = wellbore radius (m)
- x = vapor phase mass fraction
- ρ_f = density of pore fluid (kg/m³)
- ρ_r = density of reservoir rock (kg/m³)

ρ_v = steam phase density (kg/m^3)
 ρ_L = water phase density (kg/m^3)
 ϕ = porosity
 λ = decay constant for radon (0.181/day)

ACKNOWLEDGMENT

The authors express their appreciation to the Comisión Federal de Electricidad, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, B.C. for their assistance in our study of the Cerro Prieto field. This research was carried out under Research Contract EY 76-S-03-0326 with the U.S. Department of Energy.

REFERENCES

- Allen, E. T. and A. L. Day. 1935. Hot Springs of Yellowstone National Park, Carnegie Inst. Washington Pub. 466.
- Andrews, J. N. and D. F. Wood. 1972. Mechanism of Radon Release in Rock and Matrices and Entry into Ground Waters, Institution of Mining and Metallurgy Transactions, 81: (792).
- Barretto, P. M. C. 1975. Radon-222 Emanation Characteristics of Rocks and Minerals, National Energy Commission, Rio de Janeiro, Brazil, IAEA-PL-565/1.
- D'Amore, F., R. Sabroux, J.C. and P. Zettewoog. 1978-79. Determination of Characteristics of Steam Reservoirs by Radon-222 Measurements in Geothermal Fluids, Paleoph, 117: 253-261.
- D'Amore, F. and J. C. Sabroux. 1976. Signification de la Presence de Radon-222 dans les Fluides Geothermiques, Bull. Volcanol. 40: 1-10.
- Ellis, A. J. 1962. Interpretation of Gas Analyses from the Wairakei Hydrothermal Area, New Zealand Journal of Science, 5: 434.
- Ellis, A. J. and W. A. J. Mahon. 1977. Chemistry and Geothermal Systems, Academic Press, New York.
- Facca, G. and F. Tonani. 1962. Natural Steam Geology and Geochemistry in Geothermal Energy, U. N. Conference New Sources of Energy, Rome, 2: 219-229.
- Kruger, P., Stoker, A., and A. Umaña. 1977. Radon in Geothermal Reservoir Engineering, Geothermics, 5: 13-19.
- Macias-Chapa, L. 1981. Radon Emanation in Geothermal Reservoirs, Engineers Thesis, Dept. of Civil Engineering, Stanford University.
- Mañón, A., Sanchez, A., Fausto, J.J., Jiménez, M.E., Jacobo, A., and I. Esquer. 1978. Modelo geoquímico preliminar del campo geotérmico de Cerro Prieto, Proceedings of First Symposium on The Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, LBL-7098, pp. 83-94.
- Semprini, L. and P. Kruger. 1980. Radon Transect Analysis of Geothermal Reservoirs, Paper SPE-8890, Trans. 50th Annual California Regional Meeting, SPE, Los Angeles, Apr. 9-11.
- Stoker, A. and P. Kruger. 1975. Radon Measurements in Geothermal Reservoirs, Proceedings Second U.N. Symposium on the Use and Development of Geothermal Energy, San Francisco, CA.
- Warren, G. 1980. Radon Transients in Vapor Dominated Geothermal Reservoirs, Engineers Thesis, Dept. of Civil Engineering, Stanford University.
- Warren, G. and P. Kruger. 1979. Transients in Vapor Dominated Geothermal Reservoirs, California Regional Meeting, SPE and AIME Ventura, CA.

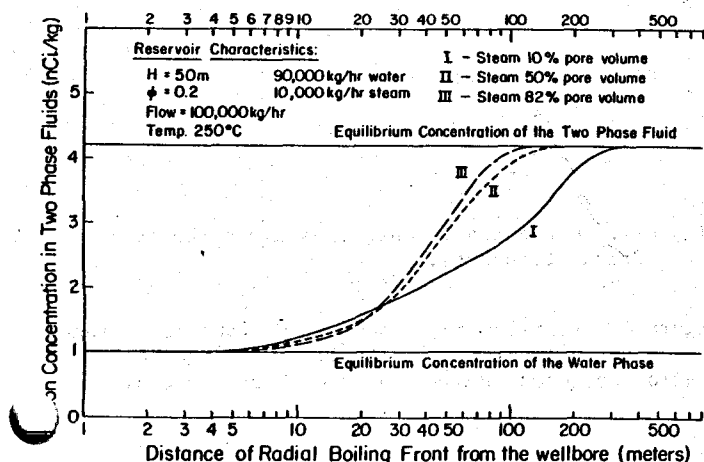


Figure 1. Theoretical prediction of the steady state wellhead radon concentration in a two-phase reservoir having a radial boiling front.

Figura 1. Predicción teórica de la concentración estacionaria de radón en el cabezal, para un yacimiento de dos fases con un frente radial de ebullición.

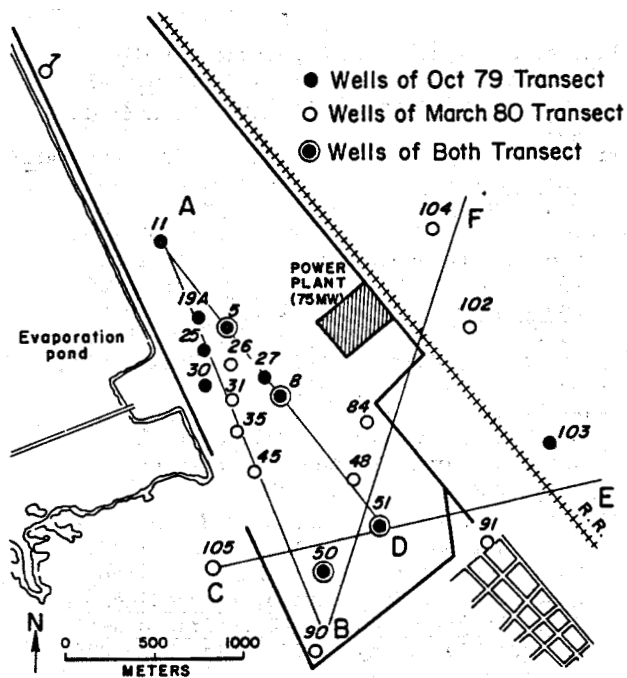


Figure 2. Location of wells and cross-section of the Cerro Prieto transect tests.

Figura 2. Localización de los pozos y de las secciones transversales en Cerro Prieto.

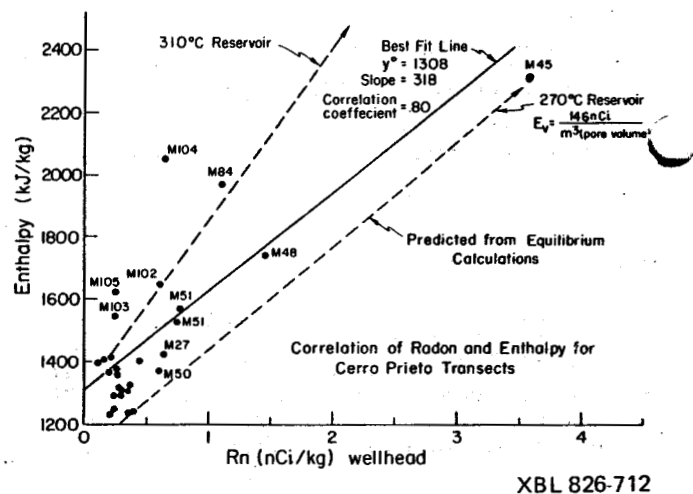


Figure 3. Linear correlation of radon concentration and fluid enthalpy in the Cerro Prieto transects.

Figura 3. Correlación lineal entre concentración y la entalpía de fluidos en las secciones transversales de Cerro Prieto.

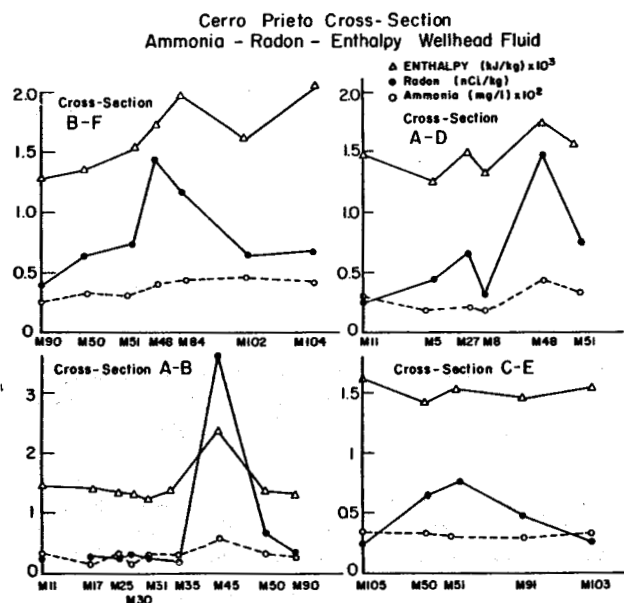


Figure 4. Concentration profiles along the four Cerro Prieto transects.

Figura 4. Perfiles de concentración (amoníaco, radón y entalpía del fluido de cabezal) a lo largo de las cuatro secciones transversales en Cerro Prieto.

Table 1. Cerro Prieto transect, October 1979.

Tabla 1. Cerro Prieto, sección transversal, Octubre 1979.

Well No.	P _{WH} * (psig)	P _{sep} (psig)	Enthalpy (kJ/kg)	Q _s (vapor) (t/hr)	Q _L (liquid) (t/hr)	Rn (vapor) (nCi/kg)	Rn (WH) (nCi/kg)	NH ₃ (vapor) (mg/l)	NH ₃ (WH) (mg/l)
M-11	95	92.5	1406	14.7	28.5	0.63	0.214	65.6	28.9
M-19A	100	97.5	1372	55.0	166.8	0.79	0.253	45.4	19.2
M-5	102	91.0	1230	31.5	92.6	1.46	0.370	48.1	17.6
M-25	225	96.0	1306	37.1	91.4	0.94	0.271	75.5	31.0
M-8	100	92.0	1306	34.4	83.4	0.97	0.283	40.2	16.0
M-27	92	92.0	1425	25.5	47.4	1.85	0.647	46.1	20.7
M-30	110	94.0	1302	49.7	123.6	1.07	0.307	47.7	18.8
M-51	121	118.0	1569	97.3	142.3	1.87	0.759	35.6	17.7
M-103	867	127.0	1546	117.0	183.7	0.63	0.246	67.6	32.5
M-50	125	108.0	1400	83.9	172.0	0.46	0.16	69.3	29.8

*Well data from the field operation report for October 1979 of the Comisión Federal de Electricidad,
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, B.C.

Table 2. Cerro Prieto transect, March 1980.

Tabla 2. Cerro Prieto, sección transversal, Marzo 1980.

Well No.	P _{WH} * (psig)	P _{sep} (psig)	Enthalpy (kJ/kg)	Q _s (vapor) (t/hr)	Q _L (liquid) (t/hr)	Rn (vapor) (nCi/kg)	Rn (WH) (nCi/kg)	NH ₃ (vapor) (mg/l)	NH ₃ (liquid) (mg/l)	NH ₃ (WH) (mg/l)	K = $\frac{[NH_3]_{\text{steam}}}{[NH_3]_{\text{liquid}}}$
M-5	105	93.5	1300	31.3	77.1	1.35	0.39	78	ND	30.9	ND
M-26	405	96	1262	41.4	113.6	0.99	0.26	71	10.1	26.4	7.0
M-31	100	97.5	1231	31	91.2	1.01	0.26	72	8.4	24.5	8.6
M-35	130	95.5	1360	63.1	136.3	0.62	0.20	63	ND	26.5	ND
M-45	101	100.5	2360	24.6	6.1	4.50	3.60	71	11.9	59.3	6.0
M-84	108	100	1967	62.5	40.1	1.85	1.13	65	12.3	44.4	5.3
M-91	110	108	1398	79.5	158.9	0.44	0.15	59	ND	25.6	ND
M-105	135	123	1607	75.7	103.4	0.48	0.20	60	11.6	32.0	5.2
M-48	125	110	1741	65.8	67.4	2.89	1.43	71	ND	40.5	ND
M-90	109	108	1298	47.9	124.6	1.37	0.38	65	9.7	25.1	6.7
M-50	129	110	1348	81.3	188.6	2.06	0.62	80	ND	33.1	ND
M-51	117	115	1528	91.3	144.2	1.92	0.74	68	10.4	32.7	6.5
M-102	90	89	1645	28.5	33.9	1.36	0.62	88	12.0	46.7	7.3
M-104	110	106	2057	31.6	91.2	2.58	0.66	106	18.0	40.6	5.9
M-8	92.5	92	1365	19.8	42.1	0.92	0.29	85	11.0	34.7	7.7

*Well data from the field operations report for March 1980 of the Comisión Federal de Electricidad,
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, B.C.

Table 3. Average rado concentrations at Cerro Prieto for average values of fluid enthalpy.

Tabla 3. Concentración promedio de radón en Cerro Prieto para valores promedio de entalpía de fluido.

Wells	Enthalpy Range (kJ/kg)	Radon Range (nCi/kg)	Ammonia Range (mg/l)	Average Enthalpy (kJ/kg)	Average Radon (nCi/kg)	Average Ammonia (mg/l)
5*,31,26,90	1230-1298	0.26 - 0.38	17.6 - 26.4	1255±32	0.32±0.07	23.4±3.9
5,30,8,25	1300-1306	0.27 - 0.39	18.8 - 31.0	1303±3	0.31±0.05	24.1±7.9
50,35,8,19A	1348-1372	0.20 - .62	19.2 - 34.2	1361±10	0.34±0.19	28.3±6.9
11,27,50	1400-1425	0.21 - 0.65	20.7 - 29.8	1410±13	0.34±0.27	26.5±5.0
103,51,51	1528-1569	0.25 - 0.75	17.7 - 32.7	1548±21	0.58±0.29	27.6±8.6
105,102	1607-1645	0.20 - 0.62	32 - 46.7	1626±27	0.41±0.30	39.9±10.9
48-84	1741-1967	1.13 -1.43	40.5 - 44.4	1854±160	1.28±0.21	42.5±2.8
104-45	2057-2360	0.66-3.60	40.6 - 59.3	2210±140	2.13±2.1	50.0±13

* The reported enthalpy of well M-5 was 1230 kJ/kg and 1300 kJ/kg in the October 1979 and March 1980 tests, respectively.

Table 4. Linear regression analyses from the Cerro Prieto transect $y = mx + b$.Tabla 4. Análisis de regresión lineal para las secciones transversales de Cerro Prieto. ($y = mx + b$).

Results Used	x (axis)	y (axis)	intercept b	slope m	corr. coeff. r
All wells	Rn (nCi/kg)	H (kJ/kg)	1308	318	0.80
Average Results	Rn (nCi/kg)	H (kJ/kg)	1246	469	0.96
All wells	NH ₃ (mg/l)	H (kJ/kg)	833	21.8	0.80
Average Results	NH ₃ (mg/l)	H (kJ/kg)	543	31.4	0.96
All wells	NH ₃ (mg/l)	Rn (nCi/kg)	0.880	0.048	0.70
Average Results	NH ₃ (mg/l)	Rn (nCi/kg)	-1.19	0.058	0.87

Table 5. Equilibrium partitioning model for ammonia and radon in high enthalpy wells at Cerro Prieto.

Tabla 5. Modelo de partición de equilibrio para amoníaco y radón en pozon de alta entalpía en Cerro Prieto.

Well	Vapor* Fraction	Liquid* Fraction	NH ₃ ** (pre-dicted) (mg/l)	NH ₃ (measured) (mg/l)	Devi-ation %	Rn*** (pre-dicted) (nCi/kg)	Rn measured (nCi/kg)	Devi-ation %
M-45	73%	27%	64	59	9%	29	3.6	800%
M-84	53%	47%	48	41	3%	21	1.13	1800%
M-48	32%	68%	39	44	8%	13	1.43	900%
M-51	16%	84%	30	32.7	9%	6.4	.74	860%

* At 290°C

** Equilibrium Ammonia Concentration: Vapor Phase 80 mg/l
Liquid Phase 20 mg/l

*** Equilibrium Radon Concentrations: Vapor Phase 40 nCi/kg
Liquid Phase 0.20 nCi/kg

SECCIONES TRANSVERSALES DE RADON Y AMONIACO A TRAVES DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

RESUMEN

Las secciones transversales de radón y amoníaco efectuadas en el campo geotérmico de Cerro Prieto, involucran mediciones de gradientes de concentración en pozos ubicados a lo largo de líneas de importancia estructural en el yacimiento. El análisis de cuatro secciones transversales mostró que las concentraciones de radón varían de 0,20 a 3,60 nCi/kg y las concentraciones de amoníaco de 17,6 a 59,3 mg/l. Los datos mostraron las concentraciones más bajas en pozos donde las entalpías del fluido son más bajas, y las concentraciones más elevadas en pozos con mayor entalpía de fluido. El análisis de correlación lineal de los datos de entalpía y de radón indicaron una fuerte relación, con una influencia marcada de las condiciones de dos fases del fluido producido. Aparentemente, después de la separación de fase en el yacimiento, el radón alcanza un equilibrio radioactivo entre fluido y roca, sugiriendo que la separación de fase ocurre bien dentro del yacimiento. Un modelo de mezcla de dos fases basado en las relaciones de entalpía-radón permite una estimación de las temperaturas de la fase fluida en el yacimiento. Las correlaciones de concentración de amoníaco con entalpía del fluido sugieren un modelo de partición de equilibrio en el cual el enriquecimiento en amoníaco está relacionado con una entalpía de vapor más elevada.

INTRODUCCION

Para estudiar las características termodinámicas y de flujo del yacimiento se efectuaron secciones transversales de radón y amoníaco en el campo geotérmico de Cerro Prieto. El método de secciones transversales descrito por Semprini y Kruger (1980) involucra mediciones del gradiente de concentración de ^{222}Rn , de una vida media de 3,83 días, y de NH_3 estable en pozos geotérmicos a lo largo de una línea de importancia estructural en el yacimiento. La combinación de un trazador radioactivo, pero químicamente inerte, de una vida media conmensurable con los procesos de interés, y de un gas no condensable y no radioactivo, pero químicamente activo, permite una evaluación del flujo y las características termodinámicas de un yacimiento geotérmico.

Kruger, Stoker y Umaña (1977) discutieron la aplicación del radón en ingeniería de yacimientos geotérmicos. La presencia del radón en geofluidos es consecuencia del decaimiento de ^{226}Ra , de una vida media de 1620 años que se encuentra uniformemente distribuido en la roca del yacimiento. El amoníaco tiene excelentes propiedades complementarias como trazador de yacimiento, aunque el origen de su presencia en fluidos geotérmicos es menos clara. Allen y Day (1935) sugirieron un origen magmático, mientras que Facca y Tonani (1962) consideraron que se debe a la degradación térmica de rocas sedimentarias. El amoníaco es bastante

soluble en agua. Por lo tanto, su concentración en geofluidos producidos debería permanecer más constante que la del dióxido de carbono (Ellis, 1962).

En este trabajo, el radón y el amoníaco se utilizaron para examinar las características del flujo de dos fases en el yacimiento de Cerro Prieto. Con trazadores conservativos y flujo concurrente de las dos fases, se espera que las concentraciones en cabezal de pozo permanezcan constantes después de la separación de fase. Sin embargo, el radón (y probablemente amoníaco) continúan siendo agregados al fluido a lo largo de su trayectoria. Dado que el término fuente de estos dos gases y su coeficiente de partición en el fluido de dos fases determina la concentración final en el cabezal de pozo como función del tiempo de tránsito y ubicación en el yacimiento, los gradientes de concentración observados de los dos trazadores deberían estar relacionados con la historia de su transporte en el yacimiento.

TRANSPORTE DE RADON EN FLUIDOS GEOTERMICOS

Dos procesos gobiernan el contenido de radón en geofluidos en el cabezal: (1) la emanación del radón de la roca del yacimiento al geofluido; y (2) el transporte convectivo del geofluido a través del yacimiento. La cantidad de emanación del radón está dada por el poder de emanación definido como la fracción del radón producido que escapa al fluido del poro. Andrews y Wood (1972), Barretto (1975) y Macías (1981), entre otros, efectuaron estudios de la emanación del radón de rocas. Se demostró que la emanación es función del tipo de roca, tamaño de partículas, densidad del fluido, y temperatura.

La concentración de equilibrio del radón en un fluido de poro geotérmico se alcanza cuando la tasa de emanación es igual a la tasa de decaimiento radioactivo en el fluido. La concentración de equilibrio del radón en un fluido de poro puede estimarse mediante la relación dada por Stoker y Kruger (1975), y D'Amore et al. (1978):

$$C_s = \frac{E_m \rho_r}{\phi \rho_f} \quad (1)$$

donde C_s = concentración de masa del radón en el fluido de poro (nCi/kg);

E_m = poder de emanación (nCi/kg);

ρ_r = densidad de la roca (kg/m^3);

ϕ = porosidad

ρ_f = densidad del fluido (kg/m^3)

Warren y Kruger (1979) discutieron la importancia de que la concentración de masa de radón en equilibrio sea inversamente proporcional a la

densidad del fluido. Esta relación se relaciona directamente al cociente entre el volumen de roca y la masa de fluido. Por ejemplo, un yacimiento predominado por vapor y otro por líquido, ambos a 240°C, pueden tener concentraciones volumétricas de radón equivalentes en los fluidos de poro del yacimiento. Sin embargo, la concentración de masa del radón sería 50 veces mayor en el yacimiento de vapor debido a las diferencias de densidad de vapor saturado y agua a dicha temperatura.

Stoker y Kruger (1975), D'Amore y Sabroux (1976) y Warren y Kruger (1979) presentaron modelos matemáticos que describen la acumulación de radón en un geofluido con transporte convectivo.

El modelo de flujo radial de Stoker y Kruger (1975) representa la acumulación de radón en un fluido no compresible para el caso de flujo horizontal hacia un pozo a través de un yacimiento de porosidad homogénea y con un contenido uniforme de radio. La geometría de flujo radial resulta de la penetración total del pozo en el yacimiento productor. Warren (1980) extendió el modelo radial, incluyendo una concentración inicial de radón en el fluido de poro en los límites de la zona de producción. En este sistema, la frontera representa una interfase en ebullición. En un sistema líquido, este límite puede representar un área de reinyección, o un frente de ebullición en un sistema de dos fases. La concentración total en el pozo está dada por la siguiente ecuación:

$$C_T = C_B \exp \left[\frac{-\lambda \pi H \phi}{Q} (r_e^2 - r_w^2) \right] + \frac{E}{\phi \rho_f} \left[1 - \exp \left(\frac{-\lambda \pi H \phi}{Q} (r_e^2 - r_w^2) \right) \right] \quad (2)$$

donde r_e = radio efectivo del yacimiento (m);

r_w = radio del pozo (m).

El volumen efectivo de poro está representado por el término $\pi H \phi (r_e^2 - r_w^2)$, el que, dividido por el gasto volumétrico, Q , da el tiempo de residencia en el sistema. El término $E/\phi \rho_f$ representa el radón acumulado durante el transporte desde la frontera, mientras que el término C_B representa la concentración de radón en la frontera que experimenta transporte con decaimiento radioactivo.

En todos los pozos que producen líquido, el radón que se produce en el cabezal probablemente se encuentra en su concentración de equilibrio con respecto a la roca del yacimiento, a menos que ocurra un gran cambio en alguna propiedad del yacimiento cerca del pozo, tal como del tipo de roca. Experimentos realizados por Macías (1981) demostraron que en un sistema líquido la emanación no depende mucho de la presión. La emanación debería ser casi constante a lo largo del recorrido del fluido. En sistemas líquidos de porosidad homogénea y contenido uniforme de radio. El sistema es más complicado para flujo de dos fases; la movilidad de una fase puede ser mayor que la de la otra. Las fases también pueden tener diferentes tiempos de residencia para el aumento y decaimiento del ra-

dón, y puede haber un intercambio de radón entre las fases. Dos modelos de transporte pueden considerarse: (1) el transporte radial en el que las dos fases fluyen juntas hacia el pozo, a velocidades iguales o diferentes; (2) el flujo de dos fases en el que el líquido y el vapor se separan y entran a los pozos por diferentes zonas de producción.

En estos modelos, la concentración de equilibrio del radón en el fluido de dos fases, C_T en (nCi/kg) está dada por

$$C_T = x \frac{E \rho_v}{\phi \rho_v} + (1-x) \frac{E \rho_l}{\phi \rho_l} \quad (3)$$

donde x = fracción de masa de la fase de vapor;

$(1-x)$ = fracción de masa de la fase líquida.

De acuerdo a la ecuación (3), la concentración de equilibrio del radón debería depender de la fracción de vapor y agua que entra en el pozo. La entalpía del fluido a una dada temperatura del yacimiento depende también de las fracciones de masa de vapor y líquido.

$$h_f = x h_v + (1-x) h_L \quad (4)$$

donde h_v y h_L son, respectivamente, las entalpías de las fases de vapor y líquida. Las ecuaciones (3) y (4) indican que las concentraciones del radón deberían relacionarse linealmente a la entalpía si, en cada fase, las concentraciones de radón se aproximan a las de equilibrio.

La Figura 1 muestra un conjunto de resultados para el transporte radial calculados utilizando las ecuaciones (2) y (3), con una concentración de radón que crece independientemente en las fases de vapor y líquida, después de la separación. Los resultados muestran que el grado de equilibrio alcanzado depende de la distancia entre el pozo y el punto de separación de fase, y de las movilidades relativas de cada fase, que determinan el tiempo de transporte después de dicha separación. Las tres curvas en la figura muestran el efecto de la variación en la fracción volumétrica de poro ocupada por el vapor. Cuando la fracción volumétrica es pequeña, el vapor se mueve hacia el pozo a mayor velocidad que el agua. Cuando ocurre ebullición cerca del pozo, las tres curvas indican que la concentración de radón en fluido de dos fases que entra al pozo es igual a la concentración de equilibrio inicial en el agua. A medida que el frente de ebullición se aleja del pozo, las dos fases que llegan al pozo se aproximan a la concentración de equilibrio de la mezcla de dos fases. Los resultados muestran también que, cuando se incrementa la fracción de vapor en el espacio poroso, decrece la distancia necesaria para alcanzar la concentración de equilibrio. De este modo, el modelo ofrece esperanza de que las mediciones del trazador puedan ser útiles para determinar la distancia de un frente de ebullición a un pozo y las permeabilidades relativas del yacimiento.

TRANSPORTE DE AMONIACO EN YACIMIENTOS LIQUIDOS DE DOS FASES

La concentración de amoníaco en fluidos de dos fases también puede utilizarse para determinar si las dos fases fluyen juntas hacia el pozo o si se está produciendo una fase preferencialmente. Si en estado estacionario se conserva el amoníaco durante el transporte de las dos fases, el amoníaco del flujo combinado debería ser igual a la concentración de amoníaco en el líquido original. Si después de la separación, la fase de vapor se produce en una zona de producción diferente, se espera que la concentración de amoníaco se incremente con el aumento del contenido de vapor. También puede ocurrir un enriquecimiento del amoníaco cuando las dos fases fluyen juntas, pero no en condiciones de régimen estacionario. Ellis y Mahon (1977), por ejemplo, observaron en el campo de Broadlands en Nueva Zelanda correlaciones positivas entre el contenido de gas del fluido de dos fases y la entalpía, sugiriendo flujo preferencial de vapor.

METODOS DE MUESTREO

Las muestras del radón se obtuvieron del vapor de los separadores ciclónicos de Cerro Prieto. Los análisis de la concentración del radón se efectuaron en los laboratorios de Stanford mediante la técnica desarrollada por Stoker y Kruger (1975). Se hicieron mediciones del balance de masa en los separadores para determinar la distribución del radón entre las fases de vapor y agua. El contenido de radón en la fase de agua se determinó por un método de doble extracción en el cual el primer análisis determina el contenido total de radón en la muestra, mientras que un segundo análisis, 30 días después, determina el contenido de radio en el agua. La concentración de radón libre en el agua al tiempo de la separación ciclónica puede ser calculada usando ambas medidas de radón para las aguas. Los resultados de las pruebas de balance de masa en cuatro separadores en Cerro Prieto demostraron que la fracción de masa del radón en la fase de agua representa menos del 1 % del total de radón producido por el pozo. La concentración de radón en el cabezal se calculó de la concentración medida en la fase de vapor y de los flujos de masa de vapor y agua.

Las concentraciones de amoníaco se midieron en el vapor y en la salmuera de 10 de los 20 pozos usados en las secciones transversales. Los coeficientes de partición para el amoníaco se calcularon de las concentraciones medidas. Del rango de valores de 5.3 a 8.6, se utilizó un coeficiente de partición promedio de 6.6 para estimar las concentraciones de amoníaco en los pozos no muestreados. Las concentraciones de amoníaco en los cabezales se determinaron por el método de balance de masa.

RESULTADOS

Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados obtenidos en las dos secciones transversales realizadas en Cerro Prieto. Los datos de la Tabla 1 son de la prueba de octubre de 1979 en la que se tomaron muestras de 10 pozos. Ocho de esos pozos se localizan a lo largo de la línea de la sección transversal que corre de norte a sur a través de la zona

principal de producción. Los otros dos pozos muestreados se ubican en forma normal a la sección transversal.

La sección transversal de marzo de 1980 involucró el muestreo de 15 pozos, incluyendo 4 de los de la prueba de octubre. En la Figura 2 se presenta un diagrama esquemático del campo con la ubicación de los pozos muestreados en cada prueba.

Una observación digna de notar de los datos de las Tablas 1 y 2 es que en las secciones transversales la entalpía de los fluidos varía de 1231 a 2360 kJ/kg representando flujo desde un fluido enteramente líquido hasta uno con aproximadamente 73% de vapor a una temperatura de yacimiento de 290°C. La correspondiente concentración de radón varía de 0.20 nCi/kg a, aproximadamente 3.60 nCi/kg. La Tabla 3 muestra las concentraciones de radón promedio observadas en las secciones transversales sobre varios intervalos de entalpía de fluido. En los dos intervalos de entalpía más bajos, de 1230 a 1298 kJ/kg y de 1300 a 1306 kJ/kg, las concentraciones de radón fueron bastante constantes, con concentraciones promedios de 0.32 ± 0.07 nCi/kg y 0.31 ± 0.05 nCi/kg a entalpías promedios respectivas de 1255 kJ/kg y 1303 kJ/kg. El fluido que fluye de estos pozos de baja entalpía es predominantemente líquido. Las fases líquidas deberían mostrar concentraciones de radón más constantes dado que la densidad del agua no varía mucho con los cambios de temperatura y presión del yacimiento. A medida que aumenta la entalpía, las variaciones de la concentraciones de radón dentro de un intervalo de entalpía dado se hacen mayores. A una entalpía promedio de 1361 kJ/kg, la concentración promedio de radón fue de 0.35 ± 0.20 nCi/kg. La desviación estándar de la concentración promedio de radón se eleva cuando se eleva la entalpía, correspondiendo a mayores variaciones en concentración de pozo a pozo, causadas probablemente por condiciones de dos fases en los pozos de entalpía más elevada.

El incremento en la concentración de radón con el incremento de la entalpía es más evidente en los resultados promedios de la Tabla 3, para valores de entalpía en el intervalo de 1548 a 2210 kJ/kg, en el que la concentración promedio de radón aumentó de 0.58 a 2.13 nCi/kg.

En la Figura 3 se muestran para ambas resultados de un análisis de regresión lineal entre la concentración del radón y la entalpía. La relación lineal positiva con un coeficiente de correlación de 0.80 está influenciada por el alto contenido de radón del pozo M-45. En la Tabla 4 se dan los resultados del análisis de regresión realizado utilizando los resultados promedio de la Tabla 3 usando resultados promedios. La regresión tiene una pendiente mayor y un coeficiente de correlación más alto.

En la Figura 3 se representa mediante líneas cortadas la concentración de radón predicha por la relación lineal radón-entalpía usando las ecuaciones (3) y (4) para temperaturas de yacimiento de 270°C y 310°C. La concentración de radón de equilibrio volumétrico de 146 nCi/m³ de volumen de poro de yacimiento utilizado en las estimaciones se determinó usando la concentración promedio de radón de 0.20 nCi/kg para todos los pozos que producen

enteramente líquido en el intervalo de entalpía baja (1255 kJ/kg) y asumiendo equilibrio radioactivo. La línea de regresión de mejor ajuste para la relación entalpía-radón que se observa en la Figura 3 corresponde a una temperatura de yacimiento de 290°C. Esta temperatura cae dentro del intervalo de 270°C a 350°C predicho por Mañón et al. (1979) utilizando el geotermómetro de Na-Ca-K.

Las concentraciones de amoníaco en el flujo total de cabezal muestran cierto grado de correlación con la concentración del radón y la entalpía del fluido. La más baja concentración de amoníaco de 17.6 mg/l se observó en el pozo M-5 cuya entalpía de 1230 kJ/kg fue la más baja observada. El pozo M-45 presentó la más alta concentración de amoníaco, de 59.3 mg/l, y el contenido más alto de entalpía, de 2360 kJ/kg. En la Tabla 3 se muestran las concentraciones promedio de amoníaco observadas en varios intervalos de entalpía. Como fuera notorio en los datos del radón, las concentraciones promedio de amoníaco no cambiaron mayormente en los intervalos de entalpías bajas (de 1230 a 1569 kJ/kg), pero sí aumentaron con el incremento de la entalpía en los intervalos de entalpía mayores que 1569 kJ/kg.

Para todos los pozos estudiados se efectuaron análisis de regresión lineal entre el contenido de amoníaco y el contenido de radón, y entre el contenido de amoníaco y la entalpía del fluido. En la Tabla 4 se muestran los resultados de estos análisis. Estos mostraron que la concentración de amoníaco correlaciona positivamente con la concentración del radón. Los resultados del análisis de regresión entalpía-amoníaco mostraron una correlación significativa y positiva del amoníaco con la entalpía, con un coeficiente de correlación de 0.80, una pendiente de 21.8 kJ/mg y una ordenada en el origen de 833 kJ.

Dichas correlaciones indican que la concentración del amoníaco depende también de las condiciones de fase en el yacimiento. Los resultados de la regresión lineal donde se utilizan los valores promedio de entalpía y amoníaco dan un coeficiente de correlación de 0.96, una pendiente de 31.4 kJ/mg y una ordenada en el origen de 543 kJ. La dependencia de las concentraciones de amoníaco de las condiciones de fase podría resultar de: (1) la partición del amoníaco entre las fases líquida y de vapor; o (2) la acumulación de amoníaco en las fases líquida y de vapor después de la separación de fases, a medida que el amoníaco emana de la roca del yacimiento.

La posibilidad del proceso de partición para explicar la dependencia de la concentración de amoníaco de las condiciones de fase se estudió además mediante cálculos de partición de equilibrio de fase para los pozos M-45, M-84, M-48 y M-51. Se asumió en dichos cálculos que la concentración de amoníaco de 20 mg/l en los pozos de baja entalpía representa la concentración de amoníaco en la fase líquida. La concentración de equilibrio del amoníaco en la fase de vapor de 80 mg/l se estimó de la concentración de fase líquida de 20 mg/l y de un valor de 4.0 para el coeficiente de partición, a una temperatura de yacimiento de 290°C, con un pH estimado para la salmuera de 7.5.

La Tabla 5 da los resultados de estos cálculos de partición de equilibrio. Se muestra que las concentraciones predichas de amoníaco concuerdan con las concentraciones medidas, con valores calculados que difieren en menos de un 10% de los valores reales medidos. Dichos cálculos indican que el amoníaco se particiona entre las fases líquida y de vapor, y que después de la separación de fase no se agrega al fluido ningún amoníaco adicional.

La partición del amoníaco entre las fases líquida y de vapor impone una pregunta importante. ¿Proviene la relación radón-entalpía de la partición del radón entre las fases de vapor y líquida con variaciones en la concentración debidas a una producción preferencial en un pozo de una u otra fase? Los datos de partición de equilibrio de la Tabla 5 se basan en una concentración de equilibrio del radón de 0.20 nCi/kg en la fase líquida. La concentración de equilibrio de 40 nCi/kg en la fase de vapor se calculó utilizando un valor conservativo del coeficiente de partición de 200 a una temperatura de yacimiento de 290°C. Los resultados en la Tabla 5 muestran que las concentraciones de radón deducidas de los cálculos de equilibrio son mucho más elevadas que las medidas. Dichos resultados indican que la concentración del radón probablemente depende más del aumento en la concentración de radón en ambas fases, (agua y vapor), después de la separación de fase, que de la partición del radón entre fases.

Con el objeto de investigar en detalle las variaciones en los contenidos de radón, amoníaco y entalpía en los fluidos, se elaboraron cuatro sub-secciones transversales en el campo, utilizando resultados de las dos secciones transversales. La Figura 2 muestra la ubicación de cada sección transversal. La Figura 4 muestra la variación de la entalpía, y de la concentración de radón y amoníaco a lo largo de cada una de las secciones transversales.

La sección transversal A-B en la Figura 2, que corre de norte a sur, muestra el incremento de los tres componentes en el pozo M-45 comparado con otros pozos de la sección. En el pozo M-45 la concentración de radón es aproximadamente 15 veces mayor que la de los pozos al norte de la sección transversal, mientras que la concentración de amoníaco es sólo 2.5 veces mayor. Los pozos al norte, del M-11 al M-31, producen fluidos que tienen entalpías y contenidos de radón y amoníaco bajos y muy constantes, indicando en esta parte del yacimiento condiciones de flujo predominantemente de fase líquida. El cambio abrupto de los tres componentes en el pozo M-45 indica que existe un yacimiento de dos fases en esa zona del campo. Los pozos M-50 y M-90, que se hallan más al sur, tienen menor contenido de radón y entalpía que el pozo M-45, demostrando que las condiciones de dos fases disminuyen en el borde sur del campo.

La sección transversal A-D corre a lo largo de una línea noroeste-sudeste. En varios pozos, el perfil de concentración muestra el correspondiente incremento en el contenido de radón y entalpía, mientras que el M-27 tiene una concentración de radón más elevada que la de los pozos adyacentes. Esto puede indicar condicio-

nes locales de dos fases en el área del pozo M-27. El pozo M-48, localizado al sur de la zona central, mostró valores mayores de los tres componentes. La concentración de radón en el pozo M-48 fue aproximadamente 5 veces mayor que en el pozo M-8, mientras que la entalpía y las concentraciones de amoníaco fueron 1.28 y 1.17 veces mayores. En el pozo M-51, al sur del M-48, se observó una disminución del contenido de radón, entalpía y amoníaco. Sin embargo, estos valores sugieren que aún existen condiciones de dos fases en esta área del yacimiento.

La sección transversal a lo largo de la línea C-E que corre de este a oeste muestra una relación interesante entre radón y entalpía. Los pozos M-105 y M-103, al final de la sección transversal, tienen entalpías más elevadas pero concentraciones de radón más bajas, en comparación con los pozos M-50, M-51 y M-91. Dichos resultados podrían indicar temperaturas de fluido más altas hacia los extremos de la sección transversal, con fases producidas que tienen concentraciones de radón más bajas pero entalpías más elevadas.

La sección transversal B-F que corre en una dirección noreste-sudoeste, muestra una tendencia similar. La entalpía y el contenido de radón aumentan gradualmente desde el pozo M-90 al M-51, indicando un incremento gradual del contenido de vapor en la fase que fluye. El aumento abrupto en la concentración de radón en el pozo M-48 indica un incremento del contenido de vapor. La concentración de radón disminuye gradualmente en los pozos M-84, M-102 y M-104, al noreste, pero la entalpía de los fluidos permanece alta. El pozo M-84 tiene una entalpía más elevada que el M-48. Las secciones transversales C-E y B-F sugieren que los pozos más cercanos a los límites del campo pueden tener una relación radón-entalpía diferente a la de los pozos del área central del campo, a lo largo de las secciones transversales A-B y A-D. Hay dos explicaciones posibles para dicha diferencia: (1) la temperatura de los fluidos varía dentro del campo, con temperaturas elevadas en las áreas de los pozos M-105, M-84, M-102 y M-104, y (2) no se logran las concentraciones de equilibrio de radón en el área de dichos pozos.

Variaciones en las temperaturas del campo al comenzar la explotación se predijeron utilizando geotermometría de Na-K-Ca (Mañón et al., 1978). Las temperaturas predichas variaron de 270°C a 310°C en la parte norte de la zona central del campo, a lo largo de las secciones transversales A-B y A-D. Los pozos al este del campo, incluyendo los pozos M-102 y M-103 y M-104 tuvieron temperaturas predichas más elevadas, entre 330°C y 350°C. La correlación entalpía-radón que se observa en la Figura 3 indica que en estos pozos situados al este, las concentraciones de radón pueden estar correlacionadas linealmente con la entalpía a lo largo de una línea de temperatura más alta que la de la zona central del campo.

En la parte sur del campo las temperaturas predichas por geotermometría de Na-K-Ca son mayores que las sugeridas por la relación radón-entalpía.

Las temperaturas predichas para los pozos M-90, 51, 50, 48, 45, y 84 varían de 330°C a 340°C. La relación radón-entalpía mostrada en la Figura 3 predice que las temperaturas de los pozos M-50, M-51, M-48,

estarán a lo largo de la línea de mayor ajuste de 280°C, mientras que el M-84 está más próximo a una temperatura predicha de 320°C. Si la correlación radón-entalpía y su relación con la temperatura del fluido es correcta, estos resultados sugerirían una disminución en las temperaturas en el área sur del campo en explotación, mientras que han permanecido elevadas en la sección este. Nótese también que se han producido mayores cantidades de fluido de la parte sur de la zona central del campo que en la sección este. La explotación puede haber ocasionado una disminución de la temperatura con respecto a la predicha al principio mediante la geotermometría de Na-K-Ca.

La variabilidad de las concentraciones de radón parece depender de las condiciones de dos fases en el yacimiento. Las variaciones en la temperatura del fluido dentro del yacimiento podrían causar las desviaciones de la relación lineal radón-entalpía. Los resultados indican que en la parte norte de la zona central del campo el fluido es predominantemente líquido, con evidencia de condiciones de dos fases en el área del pozo M-27. En la parte sur de la zona central del campo existe una región de dos fases, en el área de los pozos M-45, M-48 y M-84, con el más alto cociente vapor/líquido producido en el pozo M-45. El cociente vapor/líquido decrece gradualmente en los pozos ubicados más hacia el sur. Los pozos de la sección norte del campo parecen producir fluidos de un yacimiento de temperatura más elevada los pozos del área central.

Las desviaciones de la relación radón-entalpía parecen más dependientes de las variaciones de temperatura dentro del campo que de la falta de equilibrio radioactivo. Si se alcanza concentraciones de equilibrio de radón en los pozos, la separación de fase debe ocurrir lejos del pozo. Utilizando el modelo de flujo radial que se da en la ecuación (2), puede estimarse la distancia radial del frente de ebullición para lograr 95% de la concentración de equilibrio, por ejemplo para las condiciones de flujo del pozo M-48. En este pozo se han estimado, gastos de vapor y líquido en el yacimiento de 43.000 kg/hr y 90.000 kg/hr respectivamente. Para lograr 95% de la concentración de equilibrio del radón se requiere un tiempo de retención de 16.5 días. Con los gastos de líquido y de vapor dados, en un yacimiento de 290°C, con una porosidad de 0.2, y un espesor de 200 m, el volumen de poro calculado es $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, correspondiendo a un frente radial de ebullición a 62 m del pozo.

La suposición de que las concentraciones de equilibrio se logran en los fluidos de dos fases, sugiere que la separación de fase tiene lugar fuera del pozo. Los resultados de las secciones transversales no prueban que se alcance el equilibrio después de la separación de fases. La dependencia de las concentraciones de radón de las condiciones de fase indican que después de la separación de fase, el tiempo de permanencia es suficiente como para que el radón se acumule en ambas de las fases que están fluyendo.

NOMENCLATURA

C_B = concentración de radón saliendo de un frente en ebullición (nCi/kg).

C_s = concentración de masa de radón en el fluido de poro (nCi/kg).

C_T = concentración total de radón en el fluido del pozo (nCi/kg).

E_m = poder de emanación (nCi/kg (roca)).

E = poder de emanación (nCi/m³ (roca)).

H = espesor del yacimiento (m).

h_f = entalpía de una mezcla de dos fases (kJ/kg).

h_v = entalpía de la fase de vapor (kJ/kg).

h_L = entalpía de la fase líquida (kJ/kg).

Q = gasto volumétrico (m³/día).

r_e = radio efectivo del yacimiento (m).

r_w = radio del pozo (m).

x = fracción de masa de la fase vapor.

ρ_f = densidad del fluido de poro (kg/m³).

ρ_r = densidad de la roca de yacimiento (kg/m³).

ρ_v = densidad de la fase vapor (kg/m³).

ρ_L = densidad de la fase líquida (kg/m³).

ϕ = porosidad.

λ = constante de decaimiento del radón (0.181/día).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a la Comisión Federal de Electricidad, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, B.C. por su ayuda en nuestro estudio del campo de Cerro Prieto. Este trabajo se llevó a cabo bajo el Contrato de Investigación EY 76-S-03-0326 con el Departamento de Energía de Estados Unidos.