

CARACTERÍSTICAS Y PRINCIPALES PROCESOS EN EL YACIMIENTO DEL ÁREA CERRO PRIETO IV

- Víctor Manuel Arellano-Gómez • Rosa María Barragán-Reyes •
- Alfonso Aragón-Aguilar • Georgina Izquierdo-Montalvo •
- Enrique Portugal-Marín •

Instituto de Investigaciones Eléctricas, México

- Marco Helio Rodríguez-Rodríguez •
- Alfredo Pérez-Hernández •

Comisión Federal de Electricidad, México

Resumen

Se realizó un estudio del yacimiento del área Cerro Prieto IV (CP IV), localizado en la parte NE del campo geotérmico Cerro Prieto, para definir sus características en el “estado temprano” y su respuesta inicial a la explotación (2000-2005). Las condiciones termodinámicas en el fondo de los pozos se obtuvieron mediante la simulación del flujo de fluidos y calor en pozos usando el programa *WELLSIM* y las historias de datos de producción. Se analizaron los datos químicos e isotópicos de los fluidos producidos para obtener sus patrones de comportamiento, así como sus cambios en el tiempo para relacionarlos con los resultados de simulación, para obtener un modelo conceptual del yacimiento. Las características termodinámicas, químicas e isotópicas indican que en el estado temprano de la explotación existían dos zonas con características muy diferentes. Esto se debe a que la Falla H divide a CP IV en dos áreas o bloques. De la línea formada por los pozos 429D, 420, 409 y 410 hacia el este-sureste, se observan pozos con entalpía muy elevada (2 000 kJ/kg o mayor), con los valores de cloruros en el yacimiento más bajos del área (7 000 mg/kg o menos), con los valores más altos de CO₂ (más de 6‰ molar) y δD en la descarga total (-94‰). A esta zona se le denominó bloque sur. De la línea formada por los pozos 419, 415 y 430D hacia el oeste-noroeste, los pozos muestran en general entalpías entre 1 400 y 1 800 kJ/kg; los cloruros de yacimiento alcanzan valores de hasta 12 000 mg/kg; los valores de CO₂ son menores a 6‰ molar y los valores de δD menores a -94‰. Para los fines de este estudio, a esta zona la llamamos bloque norte. Los principales procesos de yacimiento derivados de la explotación que se identificaron incluyen ebullición y condensación de vapor en pozos del NW y de la periferia de CP IV, así como la entrada de fluidos de menor temperatura en la parte central del área. También se encontró que el sistema de fallas asociado con esta zona del campo Cerro Prieto controla la hidrodinámica del yacimiento. Actualmente, CP IV cuenta con una capacidad instalada de generación eléctrica de 100 MW.

Palabras clave: Cerro Prieto IV, procesos de yacimiento, condiciones termodinámicas, composición química de fluidos, explotación de yacimientos.

Introducción

El campo geotérmico Cerro Prieto se encuentra localizado en el Valle de Mexicali, aproximadamente a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, en el estado de Baja California, México (figura 1). Los yacimientos de este campo se sitúan en una

cuenca tectónica rellena de sedimentos aluviales y deltaicos, limitada por la falla Cerro Prieto en el este y por la falla Imperial en el oeste. El área que se explota actualmente tiene una extensión de aproximadamente 15 km² (figura 1) y en ella se han perforado más de 300 pozos, con profundidades que varían entre 1 250 y 3 550 metros.

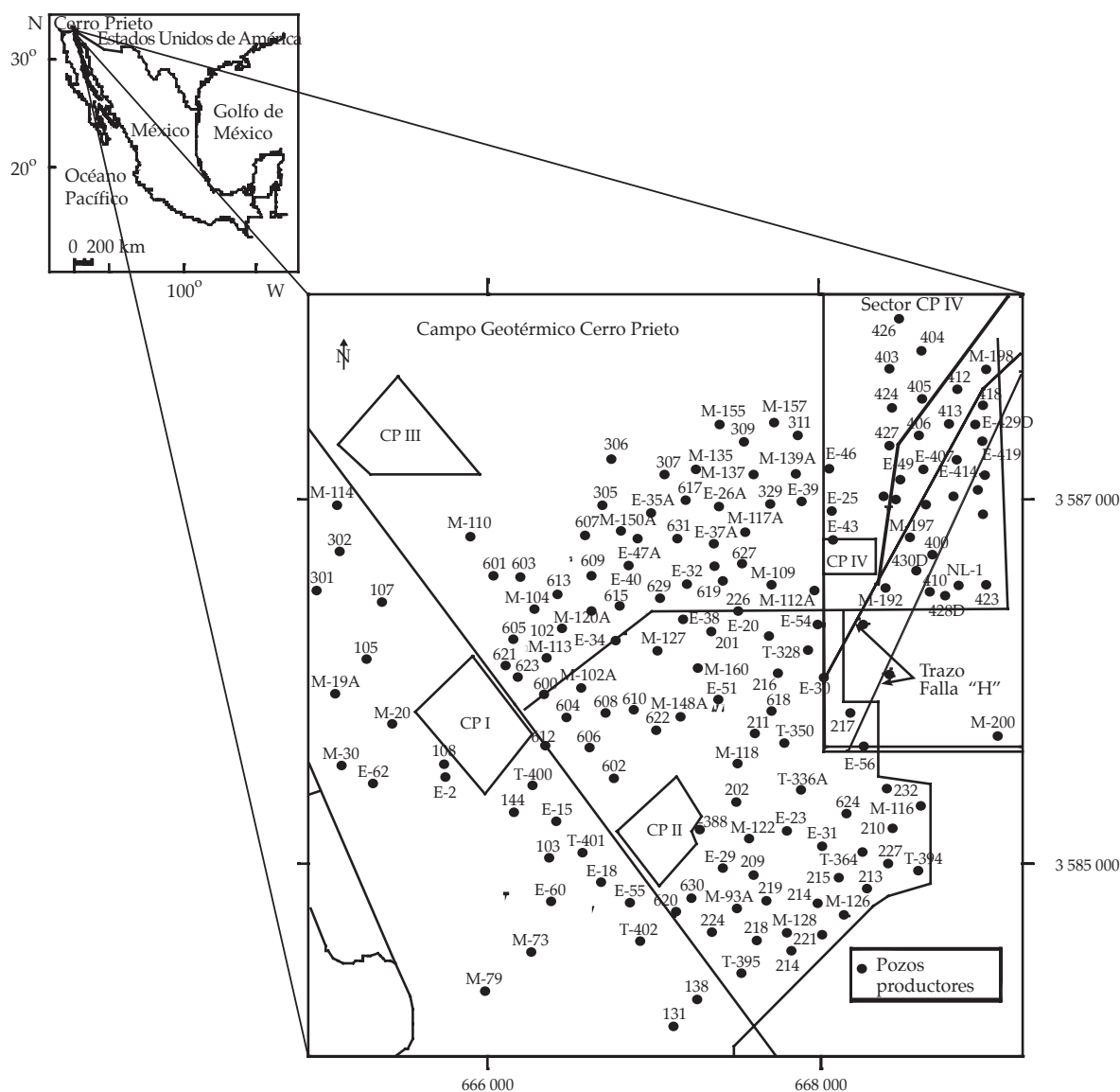


Figura 1. Localización del campo geotérmico Cerro Prieto y del sector CP IV.
Se indica el trazo de la Falla H y la localización de pozos.

Con el fin de facilitar la administración del campo, el personal técnico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) lo ha dividido en cuatro áreas principales: Cerro Prieto I (CP I), que se encuentra en la parte oeste del campo; Cerro Prieto II (CP II), en la parte sureste; Cerro Prieto III (CP III), en la parte norte; Cerro Prieto IV (CP IV), en la parte este de CP III (figura 1).

En este campo se han identificado dos yacimientos: el yacimiento alfa, que se

encuentra entre 1 000 y 1 500 m de profundidad y únicamente en el área de CP I; y el yacimiento beta, que se encuentra a profundidades mayores a 1 500 m y que cubre toda el área del campo (Lippmann *et al.*, 1991). En la actualidad (agosto de 2008), la capacidad de generación instalada en el campo es de 720 MWe.

Varios autores han discutido el comportamiento de las áreas CP I, CP II y CP III; entre estos trabajos se encuentran los

de Lippmann (1987), Truesdell *et al.* (1989), Truesdell *et al.* (1997), Lippmann *et al.* (2000) y Lippmann *et al.* (2004). En la literatura pública existe muy poca información relacionada con las características y el comportamiento del área CP IV (Rodríguez, 2003), esto se debe a que el desarrollo importante de esta zona del campo se efectuó entre los años 2000 y 2004, periodo en el que se perforaron 21 de los 30 pozos existentes, con el fin de alimentar la planta de generación Cerro Prieto IV (100 MWe).

En este artículo se describen las características y respuesta inicial a la explotación del área CP IV, que se obtuvieron a partir del análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de 28 pozos de la zona. Los objetivos del análisis fueron los siguientes: a) identificar los principales procesos que han ocurrido y están ocurriendo en el yacimiento correspondiente al área CP IV, como consecuencia de la extracción de fluidos y calor, y b) relacionar dichos efectos con sus probables causas.

Características del área en su estado natural o temprano

Los pozos producen fluidos del tipo clorurado sódico. La composición química de los fluidos producidos al inicio de la explotación se ilustra

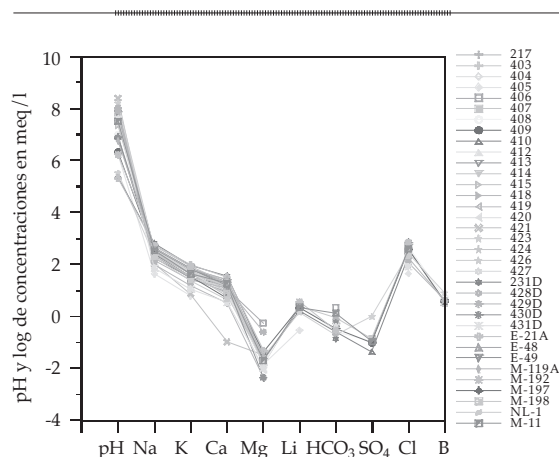


Figura 2. Diagrama de Schoeller, que muestra la composición química de los fluidos producidos por los pozos del sector CP IV al inicio de su producción.

en el diagrama de Schoeller de la figura 2. El diagrama muestra el mismo patrón de composición con mayor o menor concentración de especies, lo que denota cierta dilución del fluido del yacimiento, ya sea con condensado de vapor o con algún otro fluido más somero, menos salino y de menor temperatura. Asimismo, se observan diferencias en los valores de pH (entre 5 y 8).

Debido a que este análisis del comportamiento del yacimiento se basa en el análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción, y dado que la producción afecta el estado de las condiciones originales, aun los datos más tempranos sólo proporcionarán información aproximada del estado no perturbado del área CP IV. Como una aproximación al estado no perturbado, se tomaron los datos iniciales de los pozos que habían producido hasta el año 2001 (E-48, E-49, M-192, M-197, M-198, 403, 406, 413, 415, 420, 424 y 426). En la figura 3 se muestran las distribuciones tempranas de a) la entalpía de cabezal de los pozos; b) cloruros en el yacimiento obtenidos según el método propuesto por Truesdell *et al.* (1989); c) temperatura de yacimiento estimada mediante el geotermómetro Na/K (Nieva y Nieva, 1987); d) dióxido de carbono en la descarga total (CO_2), y (d) δD en la descarga total, respectivamente.

En la figura 3a puede verse que la entalpía se incrementa de la parte oeste a la parte este del área de estudio. En la parte oeste se encuentran pozos con valores menores a 1 600 kJ/kg, mientras que en la parte este se encuentran pozos con valores mayores a los 2 200 kJ/kg. En la parte centro-norte de CP IV se observa que los pozos 406 y 413 muestran entalpías del orden de los 1 600 kJ/kg; este rompimiento del patrón de la distribución parece sugerir la entrada de fluidos más someros al yacimiento a través de la Falla H.

La distribución de cloruros en el yacimiento (figura 3b) muestra un comportamiento contrario al de la entalpía; disminuye de la parte oeste a la parte este. En la parte oeste, en las inmediaciones del pozo M-192, se encuentran valores mayores a 12 000 mg/kg,

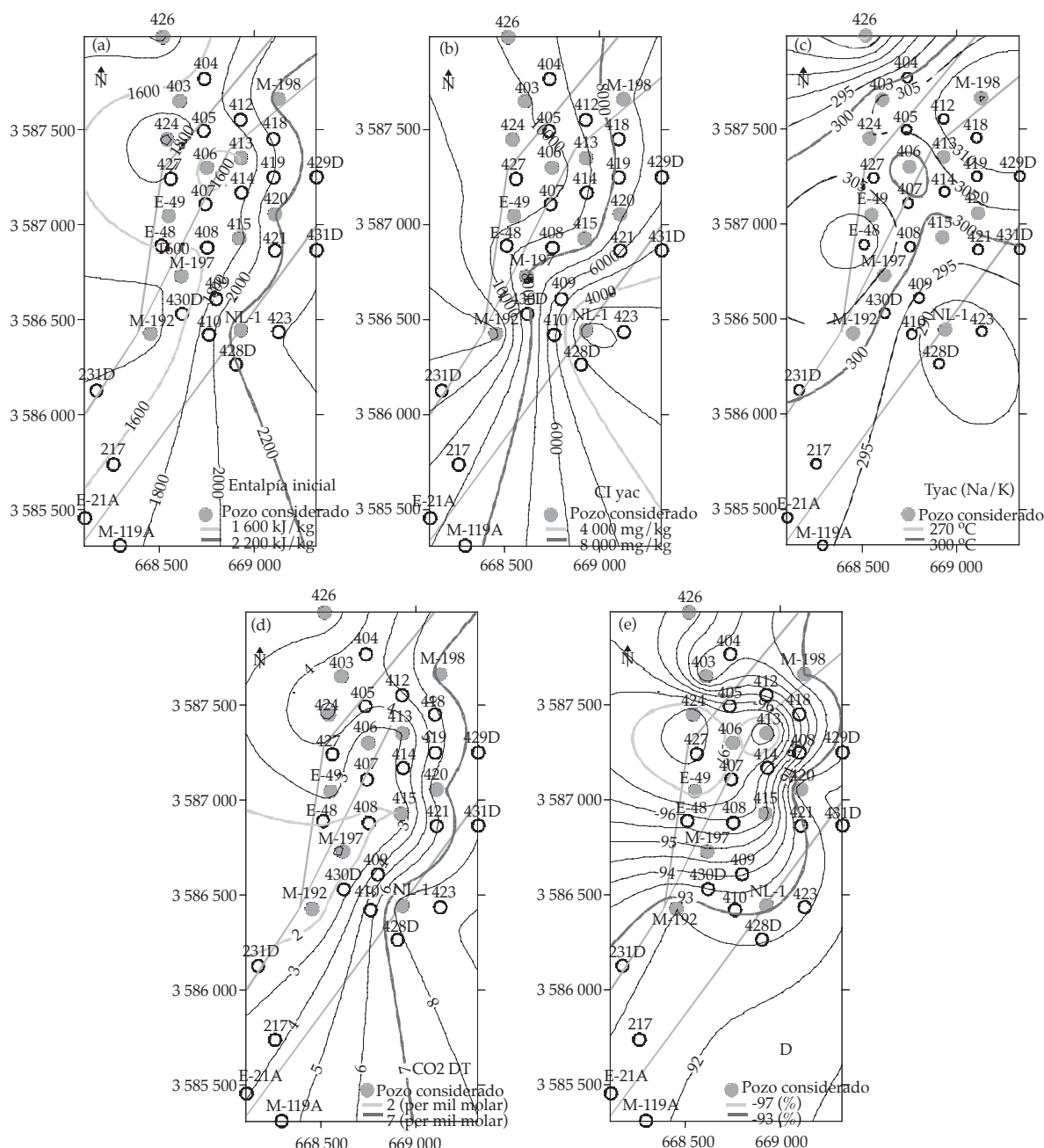


Figura 3. Distribuciones de: (a) entalpía de producción; (b) cloruros en el yacimiento; (c) temperaturas de yacimiento; (d) CO_2 en la descarga total de los pozos, y (e) δD en la descarga total de los pozos del sector CP IV, según condiciones iniciales de producción.

que disminuyen en una área muy pequeña a menos de 2 000 mg/kg en el pozo NL-1. Esta zona de altos cloruros ya había sido observada por Lippmann *et al.* (2004) en el área CP II, y se le interpretaba como la entrada de agua con

alta concentración de cloruros al yacimiento a través de la parte baja de la Falla H.

La temperatura del yacimiento se estimó tanto con geotermómetros de fase líquida (Fournier y Truesdell, 1973; Fournier y

Potter, 1982; Nieva y Nieva, 1987), como con métodos de equilibrio gaseoso. De acuerdo con el geotermómetro de composición catiónica (Na/K) (Nieva y Nieva, 1987), la mayoría de los fluidos muestra equilibrio total, indicando temperaturas de yacimiento entre 275 y 325 °C.

La figura 3c muestra la distribución de temperatura de yacimiento empleando el geotermómetro Na/K (Nieva y Nieva, 1987). En esta figura puede verse que las temperaturas más altas se encuentran en general sobre la traza de la Falla H, principalmente en la parte noreste, en las inmediaciones del pozo M-198. Los valores de temperatura disminuyen tanto hacia el noroeste como al sureste (temperaturas alrededor de los 270-280 °C), en donde probablemente la Falla H tiene una menor influencia.

La distribución inicial de CO₂ en la descarga total de los pozos (figura 3d) muestra que los valores más altos se localizan en la parte este del área de estudio (más de 7‰ molar), en donde los valores de entalpía de los pozos también son los más altos, indicando una elevada fracción de vapor. Dado que los volátiles se partitionan en la fase vapor, es razonable que los pozos con alta entalpía produzcan altos valores de CO₂.

En general, el comportamiento del CO₂ en la descarga total es muy similar al de la entalpía.

La distribución inicial de valores de δD se presenta en la figura 3e; como puede verse, los valores más altos, -93 (‰), se encuentran en la parte este y sur del área, mientras que los valores más bajos, -97 (‰), se presentan en las inmediaciones de los pozos 413 y 424, en donde se habían observado entalpías bajas y se sospechaba la entrada de fluidos someros.

Como puede verse, en una área muy pequeña (de aproximadamente 2.5 km²), se observan variaciones muy grandes en los diversos parámetros estudiados. Esto se debe a que la Falla H divide a CP IV en dos áreas o bloques con características diferentes. De la línea formada por los pozos 429D, 420, 409 y 410 hacia el este-sureste, se observan pozos con

entalpía muy elevada (2 000 kJ/kg o mayor), con los valores de cloruros en el yacimiento más bajos del área (7 000 mg/kg o menos), con los valores más altos de CO₂ (más de 6‰ molar) y δD en la descarga total (-94‰). Para los fines de este trabajo, a esta zona la llamaremos bloque sur.

De la línea formada por los pozos 419, 415 y 430D hacia el oeste-noroeste, los pozos muestran en general entalpías de entre 1 400 y 1 800 kJ/kg, los cloruros de yacimiento alcanzan valores de hasta 12 000 mg/kg, los valores de CO₂ son menores a 6‰ molar y los valores de δD menores a -94‰. Para los fines de este estudio, a esta zona la llamaremos bloque norte.

Todas estas características tan diferentes entre sí pueden verse claramente en una gráfica entalpía-cloruros en la descarga total, para los datos iniciales de todos los pozos de CP IV (figura 4). La línea gruesa que ajusta el comportamiento global de los pozos se tomó como línea base para subsecuentemente estudiar el comportamiento específico de algunos pozos representativos.

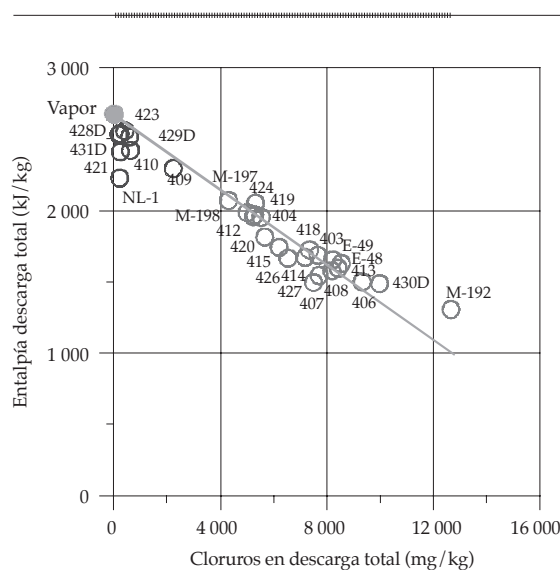


Figura 4. Entalpía *versus* cloruros en la descarga total de los pozos del sector CP IV de acuerdo con sus condiciones iniciales de producción.

El yacimiento en producción

La extracción de fluidos en CP IV se inició en 1985, con la entrada en operación de los pozos M-192 y M-197; para el año 2000, ya se habían perforado nueve pozos en el área y para el año 2004, 28 pozos explotaban esta zona del yacimiento (figura 5). Hasta octubre de 2005 se habían extraído casi 150 millones de toneladas de fluidos, de los cuales el 51% era vapor y el 49% líquido a condiciones de superficie. La mayor parte del vapor de la zona alimenta las cuatro unidades de la central CP IV, que tiene una capacidad instalada de 100 MWe y entró en operación en 2000. Hasta 2005 no se reinyectaban fluidos en el área de estudio.

Metodología

Para conocer cómo estaba respondiendo esta zona del yacimiento a la extracción de fluidos y calor, primeramente se efectuó el análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción para cada pozo, y posteriormente se efectuó

un análisis general del área. En particular, para cada pozo se estudió la evolución de los gastos de líquido, vapor y mezcla producidos; y de la presión y entalpía a fondo de pozo, estimadas por medio del simulador numérico *WELLSIM*; (Gunn y Freeston, 1991), siguiendo la metodología dada por Arellano et al. (2005).

Con el objeto de identificar la ocurrencia de procesos en los pozos y en el yacimiento, se compararon los comportamientos en el tiempo de la entalpía de la descarga total con las entalpías de líquido correspondientes a las temperaturas estimadas con un geotermómetro de cationes (Na/K), de re-equilibrio "lento" (Nieva y Nieva, 1987) y con un geotermómetro de sílice (cuarzo) de re-equilibrio "rápido" (Fournier y Potter, 1982), de acuerdo con el método propuesto por Truesdell et al. (1995).

Subsecuentemente se estudió la evolución en el tiempo de los siguientes parámetros: fracción de vapor a la entrada del pozo; cloruros en la descarga total y en el yacimiento; CO₂ en la descarga total y en el yacimiento; saturación volumétrica de líquido (SI), y δ¹⁸O y δD en la descarga total.

La fracción de vapor a la entrada del pozo (FVEP) se estimó mediante un balance de entalpía de acuerdo con el método propuesto por Truesdell et al. (1989):

$$FVEP = (H_{DT} - H_{LIQ}(TYAC)) / (H_{VAP}(TYAC) - H_{LIQ}(TYAC)) \quad (1)$$

Donde H_{DT} representa la entalpía de la descarga total; $H_{LIQ}(TYAC)$ representa la entalpía del líquido a la temperatura de yacimiento estimada mediante un geotermómetro de Na/K y $H_{VAP}(TYAC)$ es la entalpía del vapor a la temperatura del yacimiento. En este trabajo, las temperaturas de yacimiento se estimaron mediante el geotermómetro Na/K (Nieva y Nieva, 1987).

Cuando un pozo se alimenta de fase líquida y la entalpía de la descarga total corresponde a la del líquido a la temperatura del yacimiento,

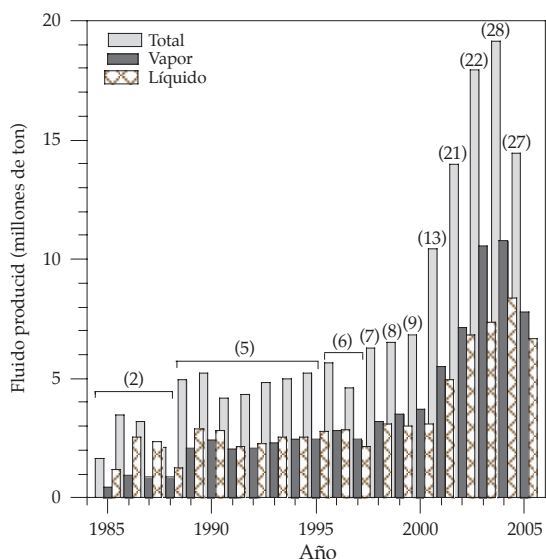


Figura 5. Producción anual de fluidos del área CP IV; entre paréntesis se indica el número de pozos que contribuyen a la misma. Para el año 2005, los datos corresponden hasta el mes de octubre.

la concentración de cloruros (y otros solutos) de la descarga total es representativa de la concentración del líquido del yacimiento. En contraste, cuando un pozo se alimenta de fluido bifásico, el vapor diluirá las especies no volátiles en una cantidad que dependerá de la cantidad de vapor que entra al pozo, también denominado “exceso de vapor” (Nieva *et al.*, 1987). En este caso, la concentración de cloruros puede estimarse corrigiendo la concentración de cloruros de la descarga total por el “exceso de vapor”. Otro método para estimar la concentración de cloruros del líquido del yacimiento (Cl_{YAC}) fue propuesto por Truesdell *et al.* (1989):

$$Cl_{YAC} = Cl_{LIQ (SEP)} \times (H_{VAP (SEP)} - H_{LIQ (TYAC)}) / (H_{VAP (SEP)} - H_{LIQ (SEP)}) \quad (2)$$

Donde $H_{LIQ (TYAC)}$ es la entalpía del líquido a la temperatura del yacimiento; $H_{LIQ (TYAC)}$ se utiliza en lugar de la entalpía de la descarga total; $H_{LIQ (SEP)}$ y $H_{VAP (SEP)}$ son las entalpías de líquido y vapor a las condiciones de separación.

El cálculo de las concentraciones de CO_2 en la descarga total y en el líquido del yacimiento se realizó según el método propuesto por Nieva *et al.* (1987). Este método proporciona una estimación del “exceso de vapor” (y) en los fluidos de alimentación de los pozos, considerando que las desviaciones reales de las concentraciones de las especies participantes en la reacción de Fischer-Tropsch, con respecto a las esperadas del equilibrio se deben a la adición (o pérdida) de vapor.

Resultados

En esta sección, y con fines de economía de espacio, únicamente se presentan los resultados relacionados con el análisis del comportamiento de la entalpía de los pozos, cloruros y temperatura de yacimiento, CO_2 y δD en la descarga total. Se considera que estos parámetros presentan una buena idea de los principales procesos que ocurren en esta zona del campo.

Entalpía de los pozos

En la figura 6 se muestran las distribuciones de entalpía de 2004 y 2005 para los pozos del área de CP IV y cuatro pozos del área de CP II (217, 231D, E-21A y M-119A). En esta figura puede verse que para el año 2004, en la parte central del área de estudio, se encontraba un grupo de pozos (406, 407, 408, 413, 414 y 427) que presentaba entalpías de 1 600 kJ/kg o menores (característica que ya se había observado en los datos tempranos). Al alejarse de esta zona, la entalpía se incrementa en todas las direcciones, encontrándose los valores de entalpía más altos en las fronteras del área. Por ejemplo, en la parte noreste se encuentra el pozo M-198, con 2 313 kJ/kg; en la parte este se encuentran los pozos 429D y 431D, con entalpías entre 2 480 y 2 550 kJ/kg; en la parte sureste se encuentra el pozo 423, con 2 530 kJ/kg; en la parte suroeste se encuentra el pozo M-197, con 2 508 kJ/kg; en la parte oeste está el pozo E-49, con una entalpía de 2 340 kJ/kg, y en la parte noroeste el pozo 424 con 2 480 kJ/kg.

Para el año 2005 puede verse que el área de pozos con entalpías de 1 600 (kJ/kg) o menores se ha incrementado, incluyendo al pozo 419. Otros pozos que presentan disminuciones en la entalpía mayores a 50 (kJ/kg) con respecto al año anterior son el 404, 406, 412, 415 y M-192. Los pozos que presentan un incremento mayor a 50 (kJ/kg) en la entalpía promedio son el 403, 420, 423, 424, 429D, 430D y M-198. En la figura 6 también puede verse que el pozo M-197 disminuye su entalpía, pero esto debido a un cambio de orificio.

En la figura 7 se muestran los comportamientos presión-entalpía a fondo de pozo, de los pozos 406, 419, M-192, 403 y 423, los cuales son representativos para describir los principales procesos del área CP IV. Estos comportamientos se presentan de manera resumida, mostrando el primer dato de su producción y el último dato con que se contaba de la misma.



la figura 7 se muestra el comportamiento del pozo 419. Con excepción del pozo 404, todos estos pozos se encuentran en la zona o en las inmediaciones de los pozos con entalpía de 1 600 kJ/kg o menor. Este grupo de pozos también está siendo afectado por la entrada de los fluidos más someros de menor temperatura.

Los pozos 414, 427, E-48 y M-192 pierden presión de manera importante y ganan poca entalpía, generando un proceso de ebullición local con ganancia de vapor. Esto se debe al

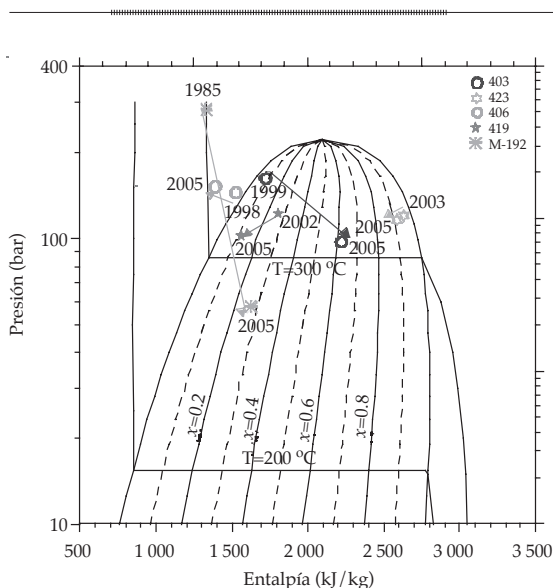


Figura 7. Diagrama presión de fondo *versus* entalpía de fondo, que muestra los cambios característicos ocurridos en los pozos 403, 406, 419, 423 y M-192 tomados como representativos.

hecho de que fluido menos caliente llega a su zona de alimentación. En la figura 7 se muestra el comportamiento del pozo M-192.

Los pozos 403, 420 y E-49 pierden presión de manera significativa (en promedio, 16.4 bar/año) y ganan entalpía de manera importante (en promedio, 75.6 kJ/kg/año), generando un proceso de ebullición moderado con ganancia de vapor. Se define como un proceso de ebullición moderado tomando como base que la entalpía crece hasta valores ligeramente mayores a 2 000 kJ/kg; posteriormente se definirán como procesos de ebullición importante para pozos con valores de entalpía mayores de 2 300 kJ/kg.

Los pozos 403 y E-49 presentan evidencias de que su área de drenaje está siendo recargada por un fluido más frío. Sin embargo, esta recarga no puede reponer el fluido a la misma velocidad con que es extraído, por lo que la presión disminuye y se incrementa la entalpía. En la figura 7 se muestra el comportamiento del pozo 403.

Los pozos 409, 410, 421, 423, 428D, 429D, M-197, M-198 y NL-1 (que se localizan principalmente en el denominado bloque sur)

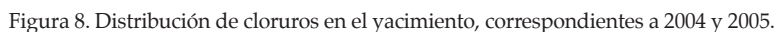
presentan entalpías muy elevadas (más de 2 300 kJ/kg) y por lo tanto un proceso de ebullición importante. La mayoría de ellos también sufre condensación de vapor. En la figura 7 su comportamiento se ve ejemplificado por el pozo 423.

Cloruros

En la figura 8 se muestra el comportamiento de los cloruros en el yacimiento para los años 2004 y 2005. En esta figura puede verse que en el año 2004 los valores más altos se encuentran en la parte suroeste del área de estudio, en donde se encuentran los pozos del área de CP II; siendo el valor más alto el del pozo 231D, con aproximadamente 15 500 (mg/kg). La figura sugiere que agua con alta concentración de cloruros entra en esta parte del yacimiento por la parte baja de la Falla H. El valor de los cloruros disminuye en dirección noreste hasta el pozo 430D, que presenta aproximadamente 10 000 mg/kg, pero principalmente disminuye hacia el este, en donde se encuentran los pozos de alta entalpía. En la zona de los pozos de baja entalpía, el 406 tiene cloruros de 8 200 mg/kg y el 413 tiene los cloruros más altos de esta zona, 10 400 mg/kg. Los pozos de alta entalpía tienen en general cloruros menores a 6 000 mg/kg.

Para el año 2005, los cloruros más altos de la zona se conservan en la parte suroeste, en donde se encuentran los pozos del área de CP II, y disminuyen hacia el pozo 430D y hacia la parte este, en donde se encuentran los pozos de alta entalpía. Los pozos que tienen bajas entalpías (406, 407, 408, 412, 413, etcétera) muestran una disminución en sus cloruros. El 406 presenta los cloruros más bajos, con aproximadamente 6 600 mg/kg, y el 413 los más altos, de alrededor de 10 000 mg/kg.

En la figura 9 puede verse el comportamiento entalpía-cloruros en la descarga total para los pozos representativos de los diversos procesos identificados (406, 419, M-192, 403 y 423). La línea gruesa que ajusta el comportamiento global de los pozos del área se tomó como la línea base para estudiar el comportamiento



verse cómo el pozo M-192 se mueve cercano a la línea de ebullición, pero nunca logra alcanzar valores altos de entalpía, a pesar de que sufre una pérdida de presión muy importante.

El pozo M-192 es un ejemplo de los pozos que presentan un proceso de ebullición local con ganancia de vapor. En la figura 9 puede

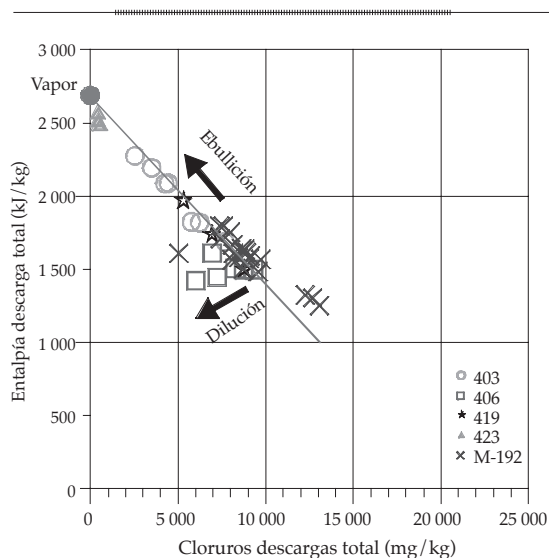


Figura 9. Valores promedio anuales de la entalpía del cabezal *versus* cloruros en la descarga total de pozos representativos (403, 406, 419, 423 y M-192) para mostrar su evolución en el tiempo.

El comportamiento del pozo 423 es un ejemplo representativo de los pozos que sufren un proceso de ebullición importante con condensación de vapor. Debido a ese fenómeno, los pozos presentan valores mínimos de cloruros para valores muy altos de entalpía y valores de pH relativamente bajos.

Temperatura de yacimiento

Las distribuciones de temperaturas de yacimiento correspondientes a 2004 y 2005 para el área de CP IV, estimadas mediante el geotermómetro Na/K (Nieva y Nieva, 1987), se muestran en la figura 10. En ambas distribuciones se aprecia que la máxima temperatura, $>300^{\circ}\text{C}$, se localiza en la dirección SSW-NNE de CP IV, con la misma orientación de la Falla H. En 2005, la isolínea de 300°C prácticamente descansa en el borde inferior del sistema de fallas, indicando la gran influencia de éstas en el comportamiento hidrológico del yacimiento. Las temperaturas decrecen hacia la parte central oeste de CP IV (pozos E-48 y E-49), donde se localizan los mínimos

valores, aunque la mayoría de pozos muestran relativamente altas temperaturas, de entre 270 y 310°C . Un cambio notable en la distribución de temperaturas correspondiente a 2005 con respecto a la de 2004, es que la isolínea de 300°C , que en 2004 se extendía desde el este hacia el oeste en la parte norte de CP IV, en 2005 ya no continúa hacia la zona noreste. Esto se debe probablemente al ligero efecto de enfriamiento en la parte norte central de CP IV por el escurrimiento de agua de menor temperatura a través de la Falla H, tal como se ha discutido para el caso de los cloruros.

CO_2 en la descarga total

En la figura 11 se presenta la distribución de CO_2 en el área de estudio para los años 2004 y 2005. Para el año 2004 puede verse que hay dos zonas con valores bajos de CO_2 (2% molar o menor): una se encuentra en la parte suroeste del área de estudio (en donde se tenían los valores más altos de cloruros, figura 8), y otra en la zona donde se encuentran los pozos con valores bajos de entalpía. Al alejarse de los pozos con baja entalpía se incrementa el CO_2 , principalmente hacia la parte noreste, alcanzándose el valor más alto en el pozo M-198 (10% molar). En la parte noroeste, el pozo 424 alcanza valores de 7% molar.

Como era de esperarse, los valores más altos de CO_2 se encuentran en las zonas con procesos de ebullición más importantes (bloque sur).

En el año 2005, las tendencias parecen ser las mismas; desafortunadamente, no se contó con información de algunos pozos importantes, como el 231D, 409, 421, 428D, 430D y E-49, lo que distorsiona un poco la figura de ese año.

Deuterio en la descarga total (δD)

En la figura 12 se presenta la distribución de δD para los años 2004 y 2005. Para el año 2004, los valores más ligeros se centran en los pozos 406 y 407. Conforme nos alejamos de estos pozos, los valores se incrementan en todas

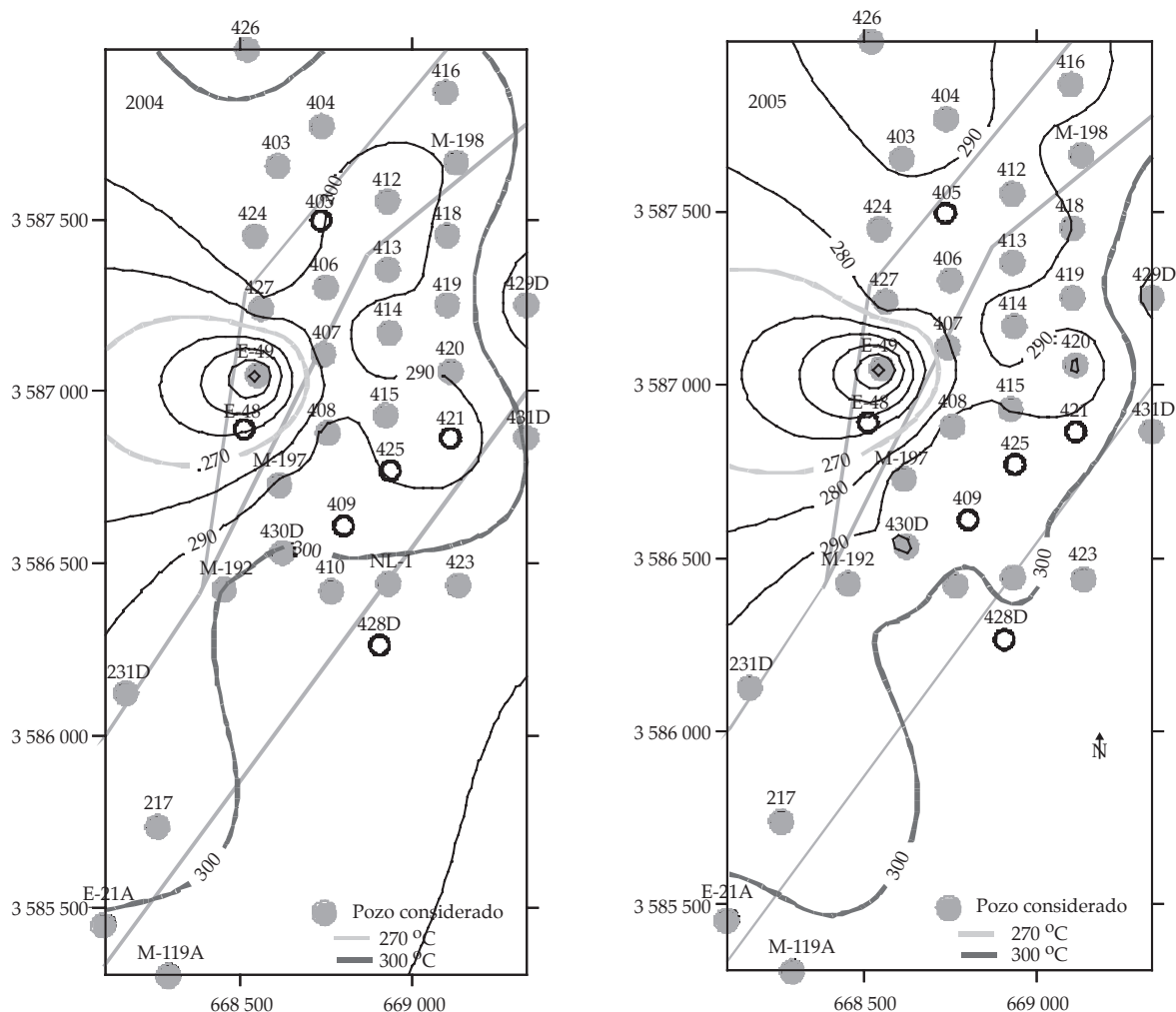


Figura 10. Distribuciones de temperatura del yacimiento (Na/K), correspondientes a 2004 y 2005 de pozos del sector CP IV.

las direcciones. Los valores más altos de δD se encuentran en la parte suroeste entre los pozos M-192 y los pozos del área de CP II. El comportamiento de este parámetro es muy parecido al que se ha visto con anterioridad en la entalpía.

Para el año 2005 se sigue un comportamiento similar, pero se observa que el área afectada por la entrada de fluidos someros y fríos se ha hecho significativamente más grande y afecta a un número cada vez más importante de pozos.

En la figura 13 se muestra el comportamiento δD versus $\delta^{18}O$ para el año 2004, en la que se ha graficado una línea de mezcla de fluidos del yacimiento con un fluido más somero y de menor temperatura, cuya composición isotópica es de aproximadamente -14.5‰ para $\delta^{18}O$ y -111‰ para δD (Portugal et al., 2006). Aquí puede verse la afectación de un número significativo de pozos por la entrada de fluidos someros en el área de los pozos 406 y 407.

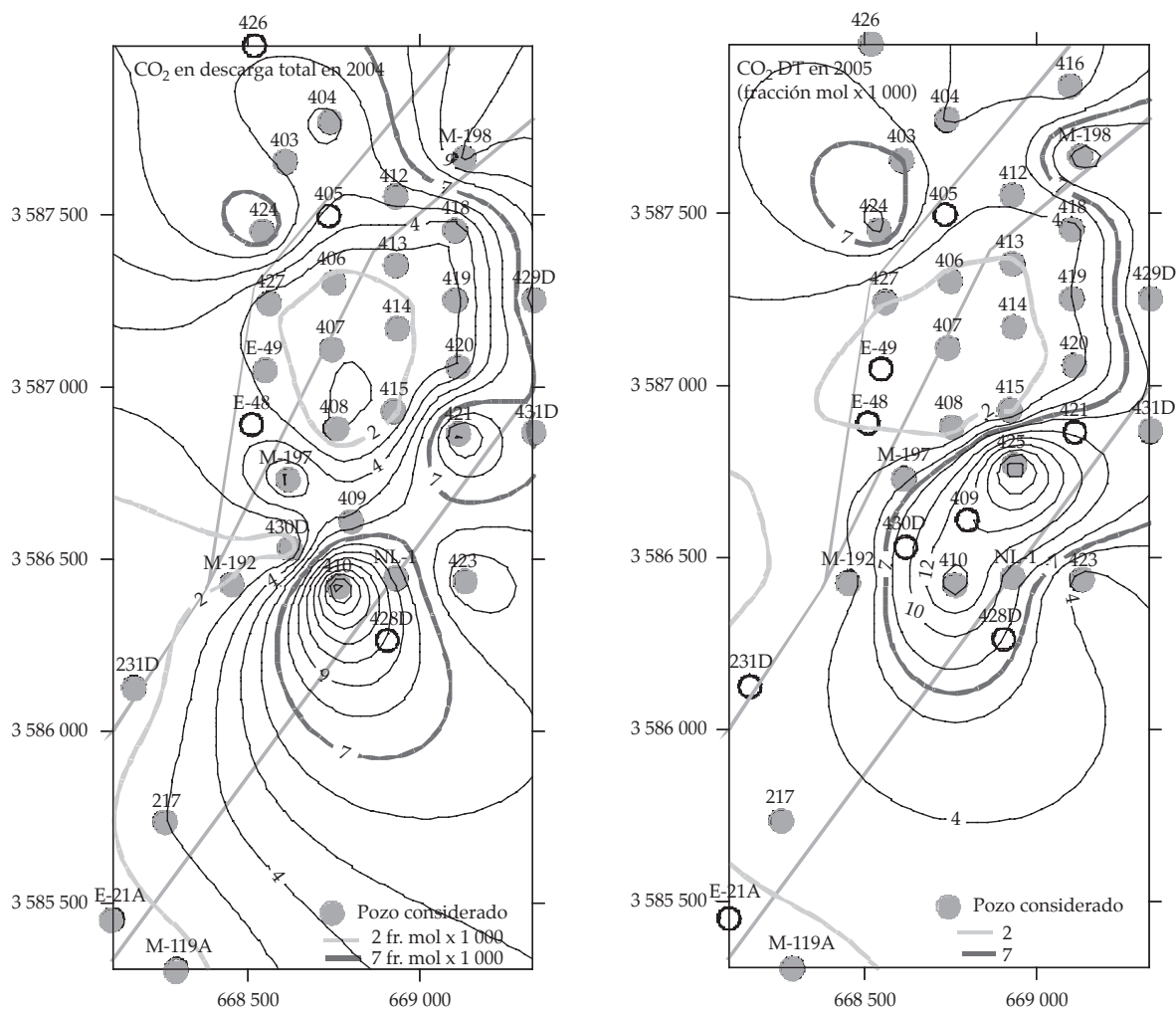


Figura 11. Distribuciones de CO₂ en la descarga total de pozos del sector CPIV, correspondientes a 2004 y 2005.

Conclusiones

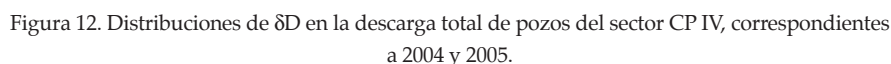
La Falla H divide a CPIV en dos áreas o bloques, con características iniciales muy diferentes. De la línea formada por los pozos 429D, 420, 409 y 410 hacia el este-sureste, se observan pozos con entalpía muy elevada (iguales o mayores a 2 000 kJ/kg), con los valores de cloruros en el yacimiento más bajos del área (menos de 7 000 mg/kg), y con los valores más altos de CO₂ (más de 6‰ molar) y δD en la descarga total (-94‰).

De la línea formada por los pozos 419, 415 y 430D hacia el oeste-noroeste, los pozos muestran

inicialmente entalpías entre 1 400 y 1 800 kJ/kg; los cloruros alcanzan valores de hasta 12 000 mg/kg; los valores de CO₂ son menores a 6‰ molar, y los valores de δD son inferiores a -94‰.

El análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de 28 pozos del área CP IV permitió la identificación de los principales procesos que ocurren en esta zona del yacimiento, como resultado de las políticas de explotación.

Los pozos ubicados en el denominado bloque sur responden a la explotación con incrementos de entalpía (valores generalmente



A diferencia del bloque sur, en donde no se observa la entrada de fluidos de menor temperatura al yacimiento, en el bloque norte ese proceso es el que rige el comportamiento de un número importante de pozos. En este bloque se observa la entrada de fluidos someros a través de la Falla H, principalmente en la zona de los pozos 406 y 407. De los pozos estudiados en este bloque, los que presentan una significativa interferencia con fluidos someros son los siguientes: 406, 407, 408, 412, 413, 414, 415, 419 y 427.

La respuesta a la explotación del bloque norte es mucho más compleja que la del bloque sur, ya que se observan cambios como disminución de presión y gasto, ebullición, entrada de fluidos someros al yacimiento e incrementos temporales en la presión y en las tasas de producción.

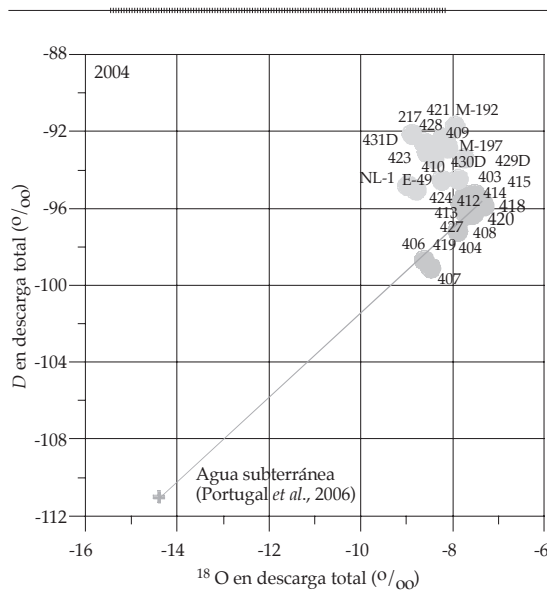


Figura 13. δD versus $\delta^{18}O$ en la descarga total de pozos del sector CP IV, correspondiente a 2004.

Agradecimientos

Los resultados que se presentan en este artículo forman parte del proyecto "Estudios Geocientíficos del Polígono Hidalgo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto", el cual forma parte de los trabajos que lleva a cabo la Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad en los campos y zonas geotérmicas de México. Los autores desean agradecer a las autoridades de la GPG por apoyar la publicación de este trabajo, así como a los revisores, al doctor David Nieva y a un árbitro anónimo por sus útiles comentarios.

Recibido: 02/10/2008
Aprobado: 08/04/2009

Referencias

- ARELLANO, V.M., TORRES, M.A. and BARRAGÁN, R.M. Thermodynamic evolution of the Los Azufres, Mexico, geothermal reservoir from 1982 to 2002. *Geothermics*. Vol. 34, 2005, pp. 592-616.
- FOURNIER, R.O. and POTTER, R.W. A revised and expanded Silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*. Nov., 1982, pp. 3-12.
- FOURNIER, R.O. and TRUEDELL, A.H. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*. Vol. 37, 1973, pp. 515-525.
- GUNN, C. and FREESTON, D. An integrated steady-state wellbore simulation and analysis package. *Proc. 13th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, 1991, pp. 161-166.
- LIPPMANN, M.J. The Cerro Prieto geothermal field. *Geothermal Science and Technology*. Vol. 1, 1987, pp. 1-38.
- LIPPMANN, M.J., TRUEDELL, A.H., HALFMAN-DOOLEY, S.E. and MAÑÓN, A. A review of the hydrogeologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics*. Vol. 20, 1991, pp. 32-39.
- LIPPMANN, M.J., TRUEDELL, A.H. and PRUESS, K. The control of Fault H on the hydrogeology of the Cerro Prieto III area. *Proceedings Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Report SGP-TR-165, 2000, pp. 266-274.
- LIPPMANN, M.J., TRUEDELL, A.H., RODRÍGUEZ, M.H. and PÉREZ, A. Response of Cerro Prieto II and III (Mexico) to exploitation. *Geothermics*. Vol. 33, 2004, pp. 227-398.
- NIEVA, D. and NIEVA, R. Developments in Geothermal Energy in México-Part Twelve: a cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. *J. Heat Recovery Systems & CHP*. Vol. 7, no. 3, 1987, pp. 243-258.
- NIEVA, D., VERMA, M., SANTOYO, E., BARRAGÁN, R.M., PORTUGAL, E., ORTIZ, J. and QUIJANO, L. Chemical and isotopic evidence of steam upflow and partial condensation in Los Azufres reservoir. *Proceedings 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, 1987, pp. 253-259.
- PORTUGAL, E., ARELLANO, V.M., ARAGÓN, A., BARRAGÁN, R.M., IZQUIERDO, G. y TORRES, J. *Estudios geocientíficos del Polígono Hidalgo del campo geotérmico de Cerro Prieto*. Informe final. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, IIE/11/12875, 2006, 650 pp.
- RODRÍGUEZ, M.H. Response of northeastern Cerro Prieto wells to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*. Vol. 27, 2003, pp. 779-784.
- TRUEDELL, A.H., TERRAZAS, B., HERNÁNDEZ, L., JANIK, C.J., QUIJANO, J.L. and TOVAR, R. The response of the Cerro Prieto reservoir to exploitation as indicated by fluid geochemistry. *Proceedings CFE-DOE Symposium in Geothermal Energy*. DOE CONF 8904129, 1989, pp. 123-132.
- TRUEDELL, A.H., LIPPMANN, M., QUIJANO, J.L. and D'AMORE, F. Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature, liquid-dominated geothermal fields. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, 1995. Florencia, Italia, May 18-31, 1995, pp. 1933-1938.
- TRUEDELL, A.H., LIPPMANN, M.J. and GUTIÉRREZ-PUENTE, H. Evolution of the Cerro Prieto reservoirs under exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*. Vol. 21, 1997, pp. 263-269.

Abstract

ARELLANO-GÓMEZ, V.M., BARRAGÁN-REYES, R.M., ARAGÓN-AGUILAR, A., IZQUIERDO-MONTALVO, G., PORTUGAL-MARÍN, E., RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M.H. & PÉREZ-HERNÁNDEZ, A. Characteristics and main processes in the Cerro Prieto IV reservoir. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic Engineering in Mexico* (in Spanish). Vol. I, no. 1, January-March, 2010, pp. 121-136.

A study of the Cerro Prieto IV reservoir, which is located in the NE of the Cerro Prieto geothermal field, was carried out in order to define the main characteristics at "baseline state" conditions (prior to commercial exploitation) and the initial response to exploitation for 2000-2005. The well-bottom thermodynamic conditions were obtained by simulation of heat and fluid flows in wells using the WellSim software with historical production data as input. Chemical and isotopic data of produced fluids were analyzed in order to define their behavior patterns over time. These patterns were then related to simulation results to obtain a conceptual model for the reservoir. The thermodynamic, chemical and isotopic characteristics for baseline state conditions indicated that there were two zones with different characteristics which are separated by the Fault H. From the boundary formed by the wells 429D, 420, 409 and 410 to the E-SE, wells with high enthalpies ($\geq 2,000$ kJ/kg), low reservoir chloride ($\leq 7,000$ mg/kg), high CO₂ ($\geq 6\%$ molar) and relatively depleted δD values for the total discharge (≤ -94 ‰) were found. This zone was called "southern block". The other zone was called "northern block" and is found from the location of the wells 419, 415 and 430 D to the W-NW, where wells exhibit lower enthalpies, (of between 1,400 and 1,800 kJ/kg), higher reservoir chlorides (up to 12,000 mg/kg), lower CO₂ concentrations ($\leq 6\%$ molar) and more enriched δD values (≥ -94 ‰) compared to those characteristics found for the "southern block" wells. The main reservoir processes identified to occur due to exploitation were: boiling and steam condensation in wells located at the NW and in the periphery of CP IV and the entry of lower temperature waters in the central part of the CP IV area. It was also found that the fault system associated to this part of the Cerro Prieto geothermal field controls the reservoir hydrodynamics. At present, the CP IV area has an installed power capacity of 100 MWe.

Keywords: Cerro Prieto IV, reservoir processes, thermodynamic conditions, chemical composition of fluids, reservoir exploitation.

Dirección institucional de los autores

Víctor Manuel Arellano-Gómez
Rosa María Barragán-Reyes
Alfonso Aragón-Aguilar
Georgina Izquierdo-Montalvo
Enrique Portugal-Marín

gim@iie.org.mx
portugal@iie.org.mx

Marco Helio Rodríguez-Rodríguez
Alfredo Pérez-Hernández

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Gerencia de Geotermia
Reforma 113
Colonia Palmira
62490, Cuernavaca, Morelos, México
teléfono: + (52) (777) 3623 811
vag@iie.org.mx
rmb@iie.org.mx
aaragon@iie.org.mx

Comisión Federal de Electricidad
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Residencia General de Cerro Prieto
km 26.5 carretera Pascualitos Pescaderos,
21700 Mexicali, Baja California, México
teléfono: + (52) (686) 5238 100
fax: + (52) (686) 5238 146
marco.rodriguez01@cfe.gob.mx
alfredo.perez@cfe.gob.mx