

# Primera estimulación ácida en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

*Miguel Ramírez Montes, Lilibeth Morales Alcalá, y Martha Martínez López*

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia, 58290, Mich. Correo: [miguel.ramirez02@cfe.gob.mx](mailto:miguel.ramirez02@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

El pozo H-1 fue el primer pozo perforado en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue., en 1981. Fue asimismo el primer pozo productor, con una producción inicial de vapor de 42 toneladas por hora (t/h). Su producción fue declinando paulatinamente y en 1995 fue desviado y profundizado, denominándosele como pozo H-1D. Después de su desviación su producción de vapor se recuperó parcialmente a 26 t/h, pero a partir de 2007 volvió a descender debido a incrustaciones de calcita en sus zonas productoras. Por lo tanto, en junio de 2010 fue sometido a una estimulación ácida, inyectándosele una mezcla de HCl y HF, lográndose finalmente una producción de vapor de 46 t/h, más de siete veces superior a la que tenía antes de la estimulación. En este trabajo se detallan las características del pozo y de la estimulación a la que fue sometido.

Palabras clave: Los Humeros, pozo H-1D, estimulación ácida, recuperación de producción de vapor.

## First acid stimulation at the Los Humeros, Pue., geothermal field

### Abstract

Well H-1 was the first ever drilled at the Los Humeros, Pue., geothermal field. It was drilled in 1981 and became the first production well, yielding 42 tons per hour (t/h) of steam. Over the years, production gradually declined and the well was deviated and deepened in 1995—and renamed well H-1D. After deepening, the steam production returned somewhat, to 26 t/h. Starting in 2007, steam production dropped again, caused by calcite scaling in the production zones. Thus in June 2010, the well was given acid stimulation by injecting a mixing of HCl and HF. Finally steam production of 46t/h was regained, over seven times above production before stimulation. This paper presents detailed information about the well and the acid stimulation.

*Keywords:* Los Humeros, well H-1D, acid stimulation, steam production recovering.

---

### Antecedentes

El pozo H-1 se perforó del 4 de abril al 1 de octubre de 1981 hasta una profundidad de 1458 m. Fue el primer pozo productor en el campo, con una producción de 42.5 t/h por orificio de 57.2 mm de diámetro. Con base a pruebas de incremento de presión, se determinó una transmisibilidad de la formación del orden de 0.522 d-m, considerada como una de las mejores en ese campo geotérmico (Torres, 1986). En julio de 1985 se efectuaron algunas calibraciones en el pozo para verificar su estado mecánico y se encontró resistencia a partir de los 950 m de profundidad. Entre marzo y abril de 1988 se realizaron trabajos de limpieza en sus tuberías. Se reconoció con barrena de 215.9 mm de diámetro hasta los 950 m de profundidad (colgador) y con barrena de 152.4 mm de diámetro hasta los 1402 m de profundidad, donde se mantuvo la resistencia. A fines de ese año nuevas calibraciones encontraron una resistencia a partir de los 700 m de profundidad (DEY, 1987).

La producción del pozo fue reduciéndose gradualmente, debido a la incrustación de sus tuberías con carbonato de calcio. El 1995 el pozo fue intervenido con equipo de perforación. Se abrió una ventana en la tubería de revestimiento (TR) de 244.5 mm (9<sup>5/8</sup>" ) de diámetro a los 918 m de profundidad, seguida de una perforación direccional controlada con un rumbo S64°W y un desplazamiento horizontal de 123 m, alcanzándose una profundidad vertical de 1841.6 metros. En noviembre de 1995, después de la reparación, se evaluó de nuevo el pozo, denominado ahora H-1D, obteniendo los siguientes resultados, calculados a una presión de 8 bara: producción de vapor de 26.3 t/h y producción de agua de 95.2 t/h, medidas por un orificio de 76.2 mm, y con una presión de cabezal de 20.0 bar. El pozo se reintegró al sistema de suministro de vapor, llegando a producir poco más de 40 t/h de vapor un par de años después, medido con agujero de 3<sup>1/2</sup>" de diámetro (Martínez, 2005).

La última calibración al pozo H-1D se realizó en febrero de 2007, mediante un globo de 127 mm (5") de diámetro. Se encontró que la tubería estaba obstruida a partir de 1292 m de profundidad. La calibración con una barra de 31.75 mm (1<sup>1/4</sup>" ) de diámetro indicó obstrucción a partir de 1329 m de profundidad. La obstrucción se debía a depósitos de calcita y sílice en el interior de las tuberías y en la zona anular entre el liner ranurado y el agujero de 215.9 mm (8<sup>1/2</sup>" ) de diámetro, lo cual se corroboró con índices de saturación de minerales calculados con base a la composición química de los fluidos producidos. Por su parte, la producción del pozo había descendido a unas 10 t/h de vapor hacia el año 2009, medida con orificio de 2" de diámetro (Martínez y Ramírez, 2009; CFE, 2010).

Con base en esos datos y antecedentes, se decidió someter al pozo H-1D a una estimulación ácida a fin de disolver las incrustaciones y mejorar su producción.

### **Operaciones previas a la estimulación ácida**

Antes de la estimulación, en junio de 2010 se realizó una prueba de inyección en el pozo H-1D, con tres gastos: 59 m<sup>3</sup>/h, 81 m<sup>3</sup>/h y 101 m<sup>3</sup>/h, con un volumen total de agua inyectado de 746 m<sup>3</sup>. Los elementos de presión Kuster se estacionaron a una profundidad de 1150 m. El resultado de la prueba de inyección fue un  $\Delta P_{skin}$  de +27.52, lo cual indicaba que el pozo presentaba daño en la formación.

Como paso previo a la estimulación ácida, se realizó una limpieza mecánica del pozo H-1D entre el 23 y el 30 de junio de 2010. Primeramente se inyectaron 90 m<sup>3</sup> de salmuera geotérmica a un gasto de 1.35 m<sup>3</sup> por minuto, con objeto de enfriarlo, y se corrió un registro de presión. Después se limpió y calibró la TR de 244.5 mm con una barrena de 215.9 mm (8<sup>1/2</sup>" ) de diámetro que logró llegar hasta los 850 m de profundidad. La TR de 177.8 mm (7") de diámetro se limpió con una barrena de insertos de 152.4 mm (6") de diámetro, llegando hasta 1839 m de profundidad.

Durante todos esos trabajos de limpieza, se estuvo inyectando salmuera geotérmica al pozo de manera constante, a un gasto promedio de 63 m<sup>3</sup>/h. Se presentaron pérdidas de circulación total entre los 23 m y los 871 m de profundidad, y después de los 1278 m hasta el fondo del pozo. El volumen total de salmuera perdida fue de 5330 m<sup>3</sup>.

Posteriormente a la limpieza mecánica se efectuó una nueva prueba de inyección a tres gastos: 63 m<sup>3</sup>/h, 81 m<sup>3</sup>/h y 108 m<sup>3</sup>/h, con un volumen total inyectado de 659 m<sup>3</sup>. El elemento Kuster estuvo estacionado a 1150 m de profundidad. El valor de  $\Delta P_{skin}$  se redujo a -4.88, lo que implica que ya no había daño en la formación. La Tabla 1 se muestra un comparativo de los parámetros más importantes medios y calculados durante las pruebas pre y post limpieza mecánica en el pozo.

### **Operaciones de estimulación ácida**

A partir de las características del pozo H-1D, se seleccionaron los siguientes intervalos de profundidad para realizar la estimulación: 1250 m-1300 m, 1350 m-1400 m, 1550 m-1600 m, 1700 m-1750 m.

Puesto que la incrustación era principalmente de calcita con menor proporción de sílice, se decidió utilizar una mezcla de ácidos de HCl al 12% y de HF al 3%. Primeramente se inyectó un bache de solución de HCl al 10%, con objeto de disolver el hierro y algunos de los materiales carbonatados, como un pre-lavado. Después se realizó el lavado principal con la mezcla de ácidos. A continuación se bombeó otro bache de solución de HCl al 10% y finalmente se inyectó salmuera geotérmica para desplazar la solución ácida y enjuagar las TR, con un volumen del doble del lavado principal.

Las soluciones de prelavado, lavado principal y post-lavado se prepararon entre el 8 y el 10 de julio, empezando con el llenado de los tanques con agua dulce. Después se mezclaron los aditivos (inhibidor de corrosión, surfactante, agente quelante, reductor de hierro y controlador de arcillas), y posteriormente se preparó el HCl al 10% de concentración. Durante el último día se preparó la solución ácida del lavado principal (12% HCl-3% HF) con la combinación de bifluoruro de amonio y ácido clorhídrico. También se mezclaron los aditivos para el divergente (HCl al 13% gelificado). La concentración de ácidos fue verificada previamente mediante análisis químico de muestras.

En espera del inicio de la estimulación ácida, con preventor esférico cerrado se bombeó agua geotérmica por línea de 2" a razón de 10m<sup>3</sup>/h, con el objetivo de enfriar el pozo. El 11 de julio se abrió el preventor esférico, se armó la válvula de retención y se bajó tubería de perforación franca de 3½" y 5" de diámetro hasta los 1236 m de profundidad, y se continuó bombeando agua geotérmica por la línea de 2" de diámetro para enfriar pozo.

El 12 de julio se inició la inyección de ácidos en cada uno de los intervalos propuestos. Para ello se emplearon dos bombas de desplazamiento positivo, un mezclador tipo cerrado y un compresor de descarga de aire, además de 9 *frac-tank* con capacidad de almacenamiento de 80 m<sup>3</sup> y un mezclador (*blender*) para succión de fluido de los *frac-tanks* y descarga a las unidades de alta presión.

En cada intervalo, la estimulación ácida se inició con la inyección de ácido (HCl al 10%) para el prelavado, el cual funciona como un espaciador entre la salmuera geotérmica utilizada para el enfriamiento previo y el posterior lavado principal. El objetivo, como se dijo, era disolver productos ferrosos y material carbonatado que pudieran precipitar minerales insolubles, por ejemplo CaF<sub>2</sub>, al reaccionar con el HF que se inyectaría después. Para el prelavado se utilizó una relación de 50 galones por pie, con un gasto de inyección de 131 m<sup>3</sup>/h, equivalente a 13.7 bpm (barriles por minuto).

Inmediatamente después de la etapa de prelavado se inyectó la mezcla de ácidos del lavado principal (12% HCl-3% HF). La mayor concentración de HCl tiene como finalidad disolver la calcita depositada durante la producción del pozo en las inmediaciones del agujero (zona de *flasheo*), además de eliminar la resistencia en las paredes de la formación y el daño en sus inmediaciones. El gasto de inyección del lavado principal fue de 135 m<sup>3</sup>/h (~9.1 bpm) a una presión de inyección registrada en 141.7 bar (9320 psi).

Al terminar el volumen del lavado principal se bombeó un post-lavado de HCl al 10%, con la idea que este actuara como una transición entre el lavado ácido principal y la salmuera geotérmica que se inyectaría después, reduciendo la precipitación de minerales indeseables. El gasto de inyección del post-lavado fue de 134 m<sup>3</sup>/h (~9.1 bpm) a una presión de inyección de 111.7 bar (8746 psi). Finalmente se desplazó el volumen del post-lavado con salmuera geotérmica, a fin de remover los residuos ácidos de las tuberías. El volumen de salmuera inyectado fue 1.65 veces el volumen del lavado principal. El material divergente se colocó después del primer intervalo de profundidad.

El comportamiento de la presión superficial fue prácticamente el mismo en cada uno de los intervalos tratados: la presión se iba incrementando una vez alcanzada la capacidad del pozo, y se mantenía constante con sólo pequeños incrementos debido a la reacción de las soluciones ácidas con la formación.

Las operaciones de estimulación ácida concluyeron el mismo día por la tarde, con el retiro de la tubería de perforación franca de 3½" y 5" de diámetro a la superficie, bombeando agua geotérmica por la línea de 2" de diámetro y con un gasto de 10 m<sup>3</sup>/h, a fin de mantener frío el pozo durante el retiro de la tubería y evitar riesgos de desconexión.

Los gastos y volúmenes mencionados para cada intervalo se resumen en la Tabla 1.

| Profundidad (m) | Tipo de fluido inyectado           | Gasto (m <sup>3</sup> /h) | Presión (bar) |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------|---------------|
| 1250-1300       | - Prelavado (HCl al 10%)           | 131.4                     | 139.1         |
|                 | - Lavado principal (HCl 12%-HF 3%) | 135.2                     | 111.8         |
|                 | - Post-lavado (HCl al 10%)         | 134.5                     | 141.8         |
|                 | - Divergentes                      | 134.8                     | 93.0          |
| 1350-1400       | - Prelavado (HCl al 10%)           | 128.8                     | 114.0         |
|                 | - Lavado principal (HCl 12%-HF 3%) | 135.2                     | 115.9         |
|                 | - Post-lavado (HCl al 10%)         | 135.2                     | 113.2         |
| 1550-1600       | - Prelavado (HCl al 10%)           | 132.7                     | 117.3         |
|                 | - Lavado principal (HCl 12%-HF 3%) | 136.7                     | 120.6         |
|                 | - Post-lavado (HCl al 10%)         | 136.9                     | 117.3         |
| 1700-1750       | - Prelavado (HCl al 10%)           | 129.3                     | 114.1         |
|                 | - Lavado principal (HCl 12%-HF 3%) | 137.0                     | 114.7         |
|                 | - Post-lavado (HCl al 10%)         | 136.4                     | 113.5         |

Tabla 1. Condiciones de la estimulación ácida en el pozo H-1D.

Durante las operaciones de estimulación se monitoreó el pH de los fluidos producidos por los pozos aledaños al H-1D, que son los pozos H-07 y H-08, con la finalidad de observar cualquier posible afectación en sus respectivos fluidos. Los resultados concluyeron que no hubo ninguna alteración observable en las características de los fluidos producidos en ambos pozos, ya que los valores de pH no presentaron mayor variación.

A fin de determinar los resultados de la estimulación ácida, se programó una prueba de pérdida de agua, seguida de una prueba de inyección con tres gastos y una etapa de recuperación, la cual no pudo realizarse por quedar atrapada la sonda de medición, compuesta por un elemento de temperatura y otro de presión. Por lo tanto, se cerró la válvula maestra de 254 mm y se empezaron los preparativos para la apertura del pozo.

### Apertura y evaluación del pozo

El 13 de julio se agregaron 30 barras de espumantes y se inyectó aire al pozo hasta alcanzar una presión de 460 psi, dejándolo en reposo y represionado. Al día siguiente se realizó el primer intento para hacerlo fluir. Estando el pozo represionado (para entonces la presión ya era de 580 psi), se abrió lentamente la línea de 2" de diámetro para comenzar el proceso de calentamiento de la tubería y, finalmente, habiendo descendido la presión de cabezal a 130 psi, se abrió la válvula lateral de 10" de diámetro. Sin embargo, la cantidad de agua y vapor que arrojó el pozo fue insignificante. Después abrir la válvula la presión de cabezal se redujo a 0 psi, y después se registró una presión máxima de 15 psi.

Se cerró el pozo para realizar una segunda apertura. Se agregaron nuevamente barras espumantes (ahora 60 barras) y se le inyectó aire hasta alcanzar una presión máxima de 470 psi, después de lo cual se dejó en reposo y represionado hasta el día siguiente. El 15 de julio, y registrando una presión en la cabeza de 650 psi, se abrió lentamente la línea de 2" de diámetro para comenzar el proceso de calentamiento de la tubería. Después, al descender la presión de cabezal a 300 psi, se abrió la válvula lateral de 10" de diámetro. El pozo empezó a desalojar vapor y agua unos 15 minutos después de su apertura. La presión descendió a 40 psi al terminar la apertura de la válvula, pero lentamente comenzó a incrementarse para llegar a 100 psi una hora más tarde, con una presión de labio de 5 psi. No se pudo medir el gasto de agua debido a que el vertedor tenía mucha espuma.

La presión de cabezal continuó subiendo a 134 psi, con una presión de labio de 29.2 psi y una altura en el vertedor de 39.5 cm. El gasto de vapor se calculó en 38 t/h y el de agua en 47 t/h. Al día siguiente la presión de cabezal ya era de 162 psi, la de labio había bajado a 24.5 psi y la producción de vapor se calculó en 26 t/h con 70 t/h de agua.

El pozo se mantuvo fluyendo hasta el 29 de julio, fecha en la cual se observó que el silenciador comenzaba a inclinarse debido al hundimiento en un extremo de la base, razón por la cual se restringió la apertura del pozo derivándolo por líneas de 2" mientras se acondicionaba el silenciador. En la Tabla 2 se muestran los datos medidos a condiciones de separación de 8 bara, y en la Figura 1 se muestra el comportamiento de la presión y del gasto después de la apertura del pozo.

| Fecha     | Presión de cabezal (bara) | Producción (t/h) |      |       | Entalpía de la mezcla (J/g) | Calidad (%) | Condiciones del pozo |
|-----------|---------------------------|------------------|------|-------|-----------------------------|-------------|----------------------|
|           |                           | Vapor            | Agua | Total |                             |             |                      |
| 16-jul-10 | 8.7                       | 17.7             | 56.3 | 73.9  | 1211                        | 23.9        | Orificio de 3"       |
| 17-jul-10 | 11.9                      | 17.6             | 51.1 | 68.7  | 1246                        | 25.6        | Orificio de 3"       |
| 19-jul-10 | 15.6                      | 24.9             | 62.0 | 86.9  | 1308                        | 28.6        | Orificio de 3"       |
| 20-jul-10 | 19.2                      | 32.4             | 62.5 | 94.9  | 1421                        | 34.2        | Orificio de 3"       |
| 21-jul-10 | 20.3                      | 32.7             | 65.0 | 97.7  | 1404                        | 33.3        | Orificio de 3"       |
| 22-jul-10 | 21.1                      | 33.7             | 62.6 | 96.3  | 1438                        | 35.0        | Orificio de 3"       |
| 23-jul-10 | 21.8                      | 36.9             | 62.7 | 99.7  | 1480                        | 37.0        | Orificio de 3"       |
| 26-jul-10 | 22.6                      | 39.8             | 62.9 | 102.7 | 1514                        | 38.8        | Orificio de 3"       |
| 27-jul-10 | 22.9                      | 37.8             | 62.8 | 100.5 | 1490                        | 37.8        | Orificio de 3"       |
| 28-jul-10 | 23.2                      | 39.2             | 54.8 | 94.0  | 1574                        | 41.7        | Orificio de 3"       |
| 29-jul-10 | 23.4                      | 37.9             | 59.0 | 96.9  | 1523                        | 39.2        | Orificio de 3"       |

Tabla 2. Datos medidos en los primeros diez días de la apertura del pozo, después de su estimulación.

Durante el tiempo que el pozo estuvo fluyendo se estuvo midiendo en diferentes puntos el pH del agua producida. Las mediciones mostraron un pH ácido que disminuyó hasta 4.91 unidades, por lo que se tomó la decisión de agregarle 1.5 toneladas de cal (óxido de calcio, CaO) de forma dosificada, para neutralizarlo. Se tomaron mediciones con y sin cal después del silenciador, en el cárcamo y en la descarga del pozo H-1D, así como en la presa de la unidad de generación número 2, donde se observó que el HCl que llevaba el fluido ya había sido completamente neutralizado y convertido en cloruro de calcio (CaCl).

Para determinar la capacidad máxima de producción del pozo después de su estimulación ácida, se realizó un desarrollo del 24 de agosto al 14 de septiembre de 2010, haciéndolo fluir al silenciador por orificios de 3", 4" y 4½" de diámetro, obteniendo las mediciones que se reportan en la Tabla 3. Con los datos medios de la evaluación, se configuró su curva característica (Figura 2), calculada a 8 bara de presión de separación.



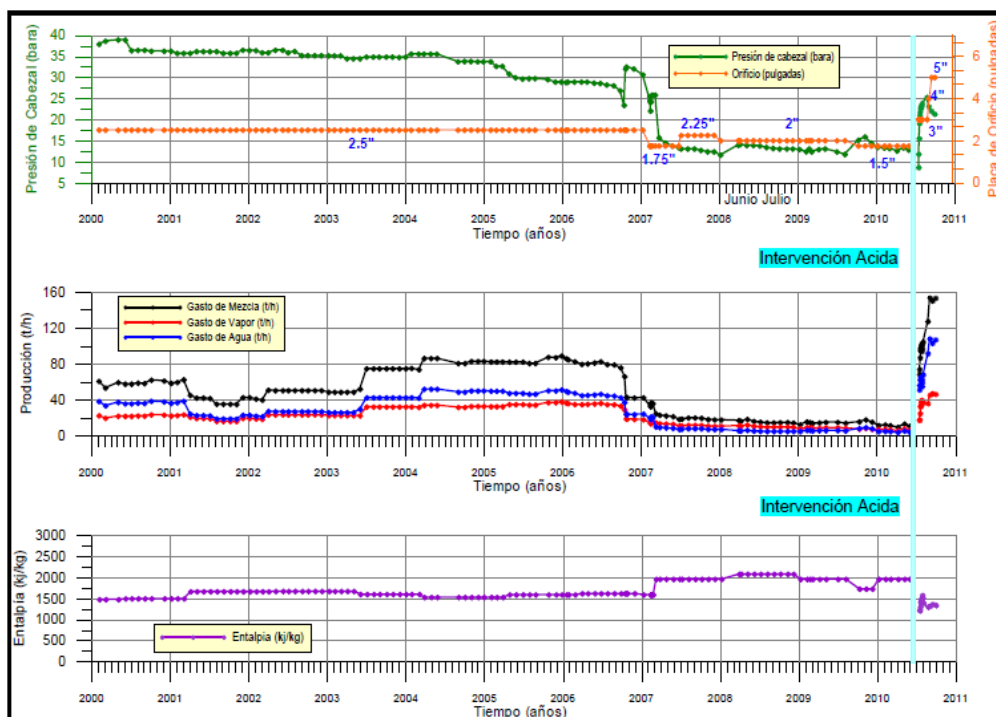


Fig. 1. Evolución de la presión de cabeza, la producción y la entalpía del pozo H-1D en los últimos años.

| Fecha     | Diámetro del orificio |       | Calidad a 8 baras (%) | Producción en t/h |      |       |
|-----------|-----------------------|-------|-----------------------|-------------------|------|-------|
|           | pulgadas              | mm    |                       | Vapor             | Agua | Total |
| 24-ago-10 | 3                     | 76.2  | 28.3                  | 36                | 91   | 127   |
| 2-sep-10  | 4                     | 101.6 | 29.4                  | 45                | 108  | 153   |
| 14-sep-10 | 4½                    | 114.3 | 31.3                  | 47                | 103  | 150   |

Tabla 3. Evaluación del pozo H-1D después de su estimulación ácida con diferentes diámetros de orificio.

La Figura 3 presenta las curvas características de producción obtenidas para el pozo H-1D en 1997, un par de años después de su profundización y desviación, en 2009 cuando la producción había descendido a su mínimo, y en septiembre de 2010, después de su estimulación ácida. Puede verse que la acidificación logró casi quintuplicar la producción de vapor del pozo, si se comparan los datos de 2009 (antes de la estimulación) con los de 2010 (después de ella). Con respecto a los datos de 1997, puede observarse que la producción es prácticamente la misma, con una ligera disminución de la presión que se atribuye a la caída de presión propia del yacimiento.

### Conclusiones

El pozo H-1 tuvo una producción inicial de 42.5 t/h medida por orificio de 57.2 mm de diámetro, la cual fue descendiendo gradualmente hasta que en 1995 fue desviado y profundizado (denominándose pozo H-1D), llegando a producir poco más de 40 t/h de vapor hacia 1997, medido por orificio de 76.2 mm de diámetro. Para el año 2007 se encontraron incrustaciones de calcita y sílice, y hacia 2009 su producción había vuelto a descender a 10 t/h de vapor medidas por orificio de 5.08 mm de diámetro. En junio de 2010 una prueba de inyección con tres gastos determinó un daño a la formación con  $\Delta P_{skin}$  de +27.52, la cual pudo reducirse a  $\Delta P_{skin}$  de -4.88 mediante una limpieza mecánica.

En julio de 2010 el pozo H-1D fue sometido a una estimulación ácida en cuatro intervalos de profundidad de 50 metros cada uno, mediante la inyección de soluciones de prelavado (HCl al 10%), lavado principal (HCl

al 12% y HF al 3%) y post-lavado (HCl al 10%), y un lavado final con salmuera geotérmica. Diez días después de la estimulación, el pozo aumentó su producción a casi 40 t/h de vapor y 55 t/h de agua, medida por orificio de 76.2 mm (3") de diámetro. Como resultado de su desarrollo entre agosto y septiembre de 2010, se midió una producción de vapor de 47 t/h de vapor y 103 t/h de agua medidas por orificio de 114.3 mm (4½") de diámetro y condiciones de separación de 8 bara.

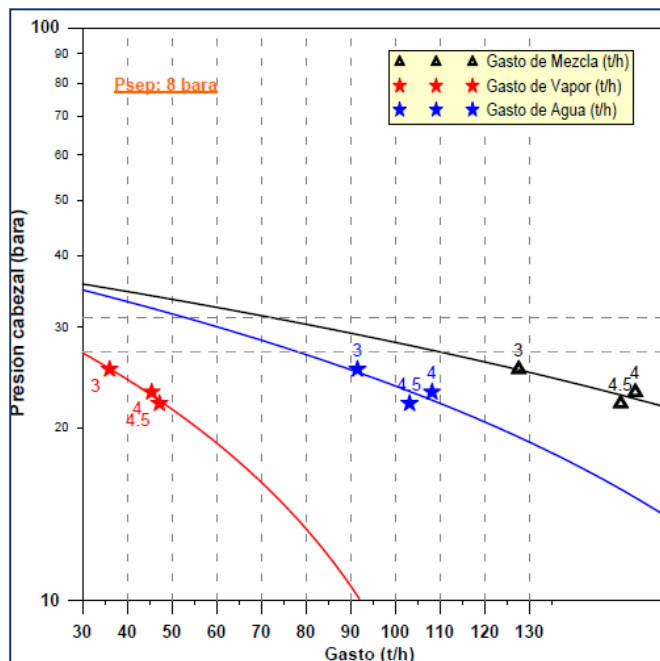


Fig. 2. Curva característica de producción del pozo H1-D después de la estimulación ácida.

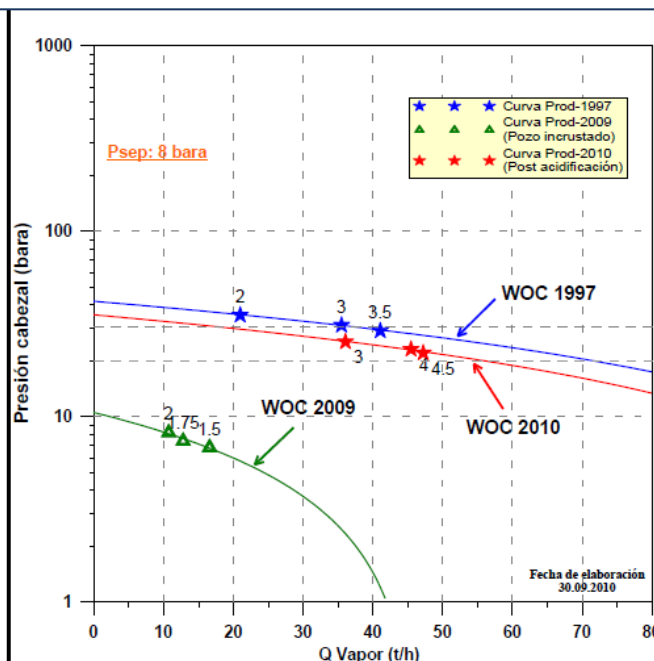


Fig. 3. Curva de producción de vapor del pozo H1-D en 1997, 2009 y 2010.

A la fecha el pozo continúa produciendo alrededor de 46 t/h de vapor (a presión de separación de 8 bara) con una presión de cabezal de 21 bara y una entalpía de 1340 kJ/kg. Por lo tanto, el pozo H-1D logró multiplicar su producción con respecto a la previa a la estimulación, con lo que se concluye que las intervenciones resultaron exitosas.

## Referencias

- CFE, 2010. Base de datos *GDManager* del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich. Inédito.
- DEY, 1987. Diagnóstico del estado actual del pozo H-1 del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. Informe interno 1387-010, CFE, Residencia de Perforación Los Humeros, Departamento de Evaluación y Yacimientos. Inédito.
- Martínez, M., 2005. Pronóstico de vapor de la Residencia Los Humeros. Informe interno RC-01-RLH-C-020, CFE, Residencia de Los Humeros. Inédito.
- Martínez, M. y M. Ramírez, 2009. Recuperación de la producción del pozo H-1D mediante la limpieza mecánica e inyección de ácidos en el Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. Informe interno DINYAC-002-2009. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich. Inédito.

Torres R., M.A., 1986. Comportamiento de las condiciones de producción de los pozos H-1 y H-7 del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. Informe interno 1386-031. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Evaluación y Yacimientos. Inédito.