

# Desarrollo de una herramienta gráfica auxiliar para el análisis de tendencias de producción de vapor en pozos geotérmicos usando MATLAB

**Daniel Hernández Balbuena y Juan de Dios Ocampo Díaz**

Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Unidad Mexicali, Blvd. Benito Juárez, s/n, C.P. 21900, Unidad Universitaria, Tel. (686) 5-66-4270 ext.1329

E-mail: [juandios@telnor.net](mailto:juandios@telnor.net), [dhernan@uabc.mx](mailto:dhernan@uabc.mx)

## Resumen

[Regresar a Contenido](#)

Para el análisis sistemático de datos históricos que requieren trabajos de pronósticos se utiliza comúnmente el análisis de series de tiempo. Los analistas elaboran gráficas con los datos de producción de vapor de los pozos contra una escala de tiempo; se estudian las gráficas y se elaboran formas o modelos compatibles. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de una herramienta de software con ambiente gráfico que puede ser utilizada para el análisis de tendencias de producción de vapor de pozos geotérmicos, misma que fue probada con datos de pozos productores del campo geotérmico de Cerro Prieto. El algoritmo utilizado en el desarrollo de la herramienta se basa en técnicas de ajuste de las tendencias de datos y modelos utilizados en la literatura especializada. El programa fue desarrollado en MATLAB, utilizando una interfase gráfica de usuario.

**Palabras clave:** Modelado matemático, producción de vapor, herramienta gráfica, MATLAB, series de tiempo.

## Abstract

The analysis of time-series is usually required for systematic analysis of historic data needing prognosis. Analysts prepare graphs with data of steam production of the wells in a time-scale; the graphs are studied and compatible forms or models are prepared. Results obtained from the development of a software tool with graphic environment, which can be used for the analysis of steam production trends in geothermal wells, are presented in this paper. That software was proven with actual data from production wells of the Cerro Prieto geothermal field. The algorithm used for developing the software is based on adjustment techniques of data and models trends, which are used in published papers. The program was developed in MATLAB, using a user graphic interphase.

**Keywords:** Mathematical modeling, steam production, graphic tool, MATLAB, time-series.

## 1. Introducción

El análisis de curvas de declinación aplicado a pozos geotérmicos permite, con base en gráficas de gasto de producción contra tiempo, extrapolar los gastos futuros de producción para determinar las reservas del yacimiento (Puente y Rodríguez, 1994; Ocampo, 1997; Ocampo *et al.*, 2000; Ocampo y De León, 2001).

Los métodos de análisis de curvas de declinación están basados en la rapidez de declinación de las gráficas del gasto de la producción contra el tiempo, es decir, la rapidez de declinación de la curva D, la cual está dada por:

$$D = -\frac{1}{q(t)} \frac{dq(t)}{dt} \quad (1)$$

Existen dos problemas fundamentales que debe enfrentar un ingeniero en yacimientos cuando se trata de definir políticas de producción de un campo que lo conduzcan a la optimización del recurso. Estos son la estimación de la producción futura de los pozos (y del campo) y su tiempo de vida útil (Rivera, 1977). Tanto en los yacimientos petroleros como en los geotérmicos, el análisis de curvas de producción responde a dichos cuestionamientos.

Existe una gran cantidad de problemas que pueden afectar la eficiencia ya sea de un pozo o de un yacimiento geotérmico; sin embargo, uno de los que causa un gran impacto es la depositación e incrustación de sólidos, tanto en las tuberías de producción de los pozos como en el mismo yacimiento, afectando la permeabilidad de la matriz de la roca almacenadora de los fluidos hidrotermales (Ocampo *et al.*, 1998; Ocampo *et al.*, 2000). Como consecuencia de lo anterior, el análisis de curvas de declinación se utiliza en los campos geotérmicos para diagnosticar diversos tipos de problemas que pueden estar afectando el comportamiento productivo de los pozos (De León *et al.*, 2001). La gran utilidad del análisis de las curvas de declinación en geotermia ha sido probada, existiendo en la literatura reportes que muestran que se trata de una herramienta de gran alcance (Rivera, 1977; Rivera, 1978; Sanyal y Che, 1982; Sanyal *et al.*, 1989a; Sanyal *et al.*, 1989b; Enedy, 1989; Fesmire, 1993; Ocampo *et al.*, 2000; Orizonte *et al.*, 2003).

Los trabajos de Arps (1945), pionero en este campo, Ramsay y Guerrero (1969), Fetkovich (1973) y algunos otros, sentaron las bases para el análisis de curvas de declinación.

Las curvas más utilizadas son las de gasto de producción contra el tiempo y las de gasto de producción acumulado contra el tiempo. Por sus características, esas curvas pueden ser clasificadas como lineales, exponenciales, armónicas o recíprocas. El modelo matemático para el gasto de producción en el tiempo es presentado a continuación:

Lineal  $q(t) = -mt + q_0$  (2)

Exponencial  $q(t) = q_0 e^{-t/a}$  (3)

Armónico  $q(t) = q_0 \left( \frac{t}{a_0} + 1 \right)^{-1}$  (4)

Recíproco en el tiempo  $q(t) = -\frac{m}{t} + c$  (5)

Recíproco del gasto de producción  $\frac{1}{q(t)} = -\frac{m}{t} + c$  (6)

y en el tiempo.

Aunque los modelos más ampliamente utilizados son los dados por las ecuaciones (3) y (4) (Arps, 1945), en fechas recientes se han presentado algunos modelos mecanistas como el de la ecuación (5) (De León *et al.*, 2001), por los que los modelos (5) y (6) fueron incluidos en la herramienta de software desarrollada en este trabajo.

## 2. Campo geotérmico de Cerro Prieto

El campo de Cerro Prieto está ubicado en el Valle de Mexicali, cubriendo una superficie aproximada de 15 km<sup>2</sup> (Fig. 1), y es considerado como el mayor de su tipo (líquido dominante) y temperaturas (superiores a 300° C). Se localiza geológicamente en el patrón tectónico del sistema de San Andrés, entre cuyas fallas destacan la Imperial y la Cerro Prieto de orientación NW-SE y con movimiento lateral derecho, considerándose que estas controlan el flujo de los fluidos hidrotermales. Estos fluidos son generados por la transferencia de calor desde una probable zona de ascenso magmático.

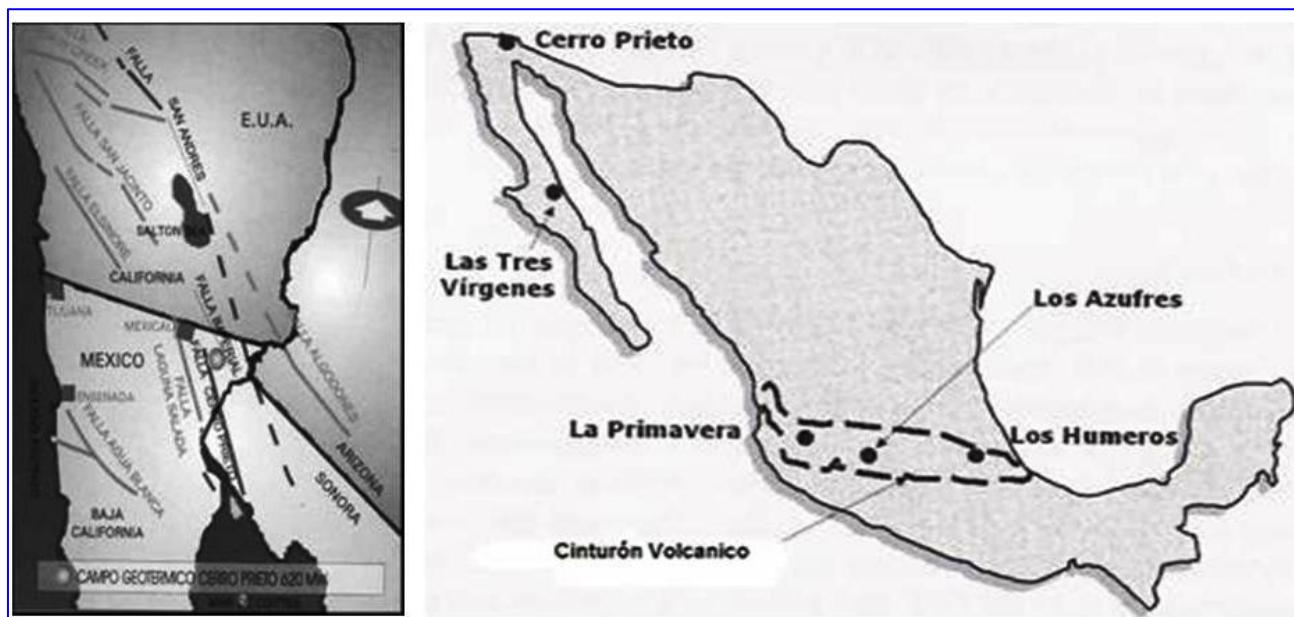


Fig. 1. Localización de Cerro Prieto y, a la derecha, los campos geotérmicos de México.

Tener éxito en llevar hasta la superficie agua caliente, vapor o ambos desde el interior de la tierra es, por supuesto, sólo el primer paso de la exploración geotérmica. Antes de saber para qué fin práctico y en qué escala pueden utilizarse estos fluidos, se deben estudiar las cantidades en que las que están disponibles y su calidad tanto física como química. Tienen que efectuarse varias mediciones importantes en cuanto sea posible después de que se ha iniciado el flujo de un nuevo pozo, con objeto de asegurar las propiedades físicas y el potencial de energía de los fluidos descargados. Las variables físicas más importantes de un pozo productivo son: Presión de cabezal, Temperatura de cabezal, Producción o flujo de masa (vapor y agua), Entalpía del fluido, y Calidad del fluido

Los pozos del campo de Cerro Prieto producen una mezcla de agua y vapor en diferentes proporciones, ya que cada uno de ellos tiene características muy particulares. Estas dependen de factores como su localización, la profundidad de los estratos productores en el yacimiento, las características constructivas del pozo (arreglo de tuberías, diámetro y longitud), el tipo de

terminación y el estado mecánico. Lo anterior provoca un amplio rango de variación en temperaturas, presiones, entalpías, flujos y composición química de los fluidos.

Para aspectos administrativos el campo se encuentra dividido en cuatro zonas productoras llamadas Cerro Prieto Uno (CPU), Cerro Prieto Dos (CPD), Cerro Prieto Tres (CPT) y Cerro Prieto Cuatro (CPC), en las cuales actualmente se encuentran construidos más de 160 pozos productores de una mezcla de agua-vapor en diferentes proporciones (Fig. 2).

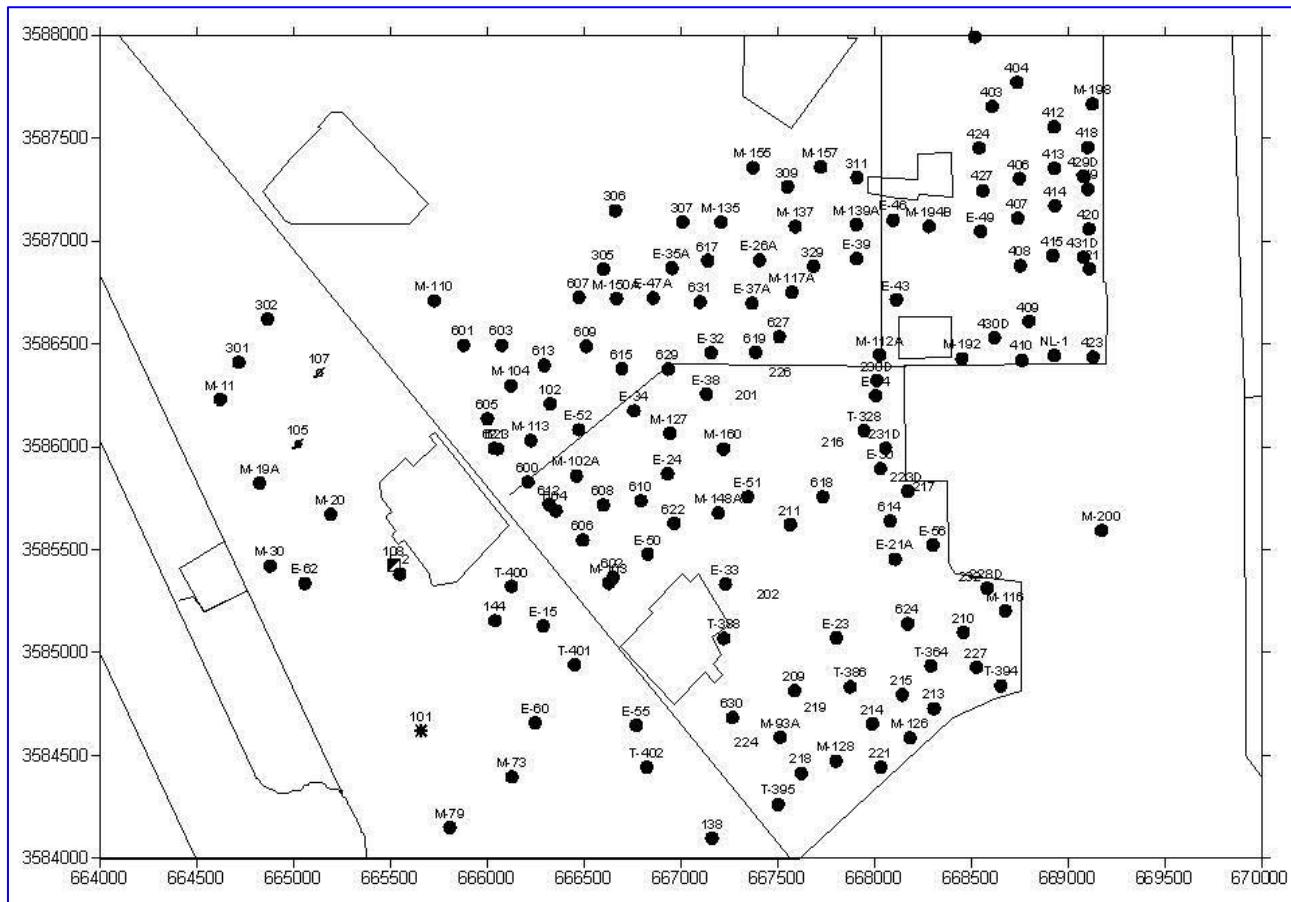


Fig. 2. Localización de pozos productores en Cerro Prieto

### 3. Desarrollo del software

La herramienta de software GEOFIT 1.0 fue desarrollada usando el ambiente gráfico de MATLAB 6.1 y está orientada al análisis de las curvas de declinación de la producción de pozos de campos geotérmicos. Para ello realiza el ajuste mediante mínimos cuadrados de los datos proporcionados de producción y las curvas teóricas presentadas en las ecuaciones (2) a (6), después de realizar la linealización correspondiente a cada caso.

Los datos de producción son importados de una hoja de cálculo genérica en formato de columnas. En la Figura 3 se muestra la interfase gráfica para la selección del archivo de datos a utilizar, la cual es activada por la opción ARCHIVO en el menú. El programa automáticamente depura los

elementos NaN (no es un número) que puedan presentar los datos por la ausencia de mediciones y elimina los renglones correspondientes.

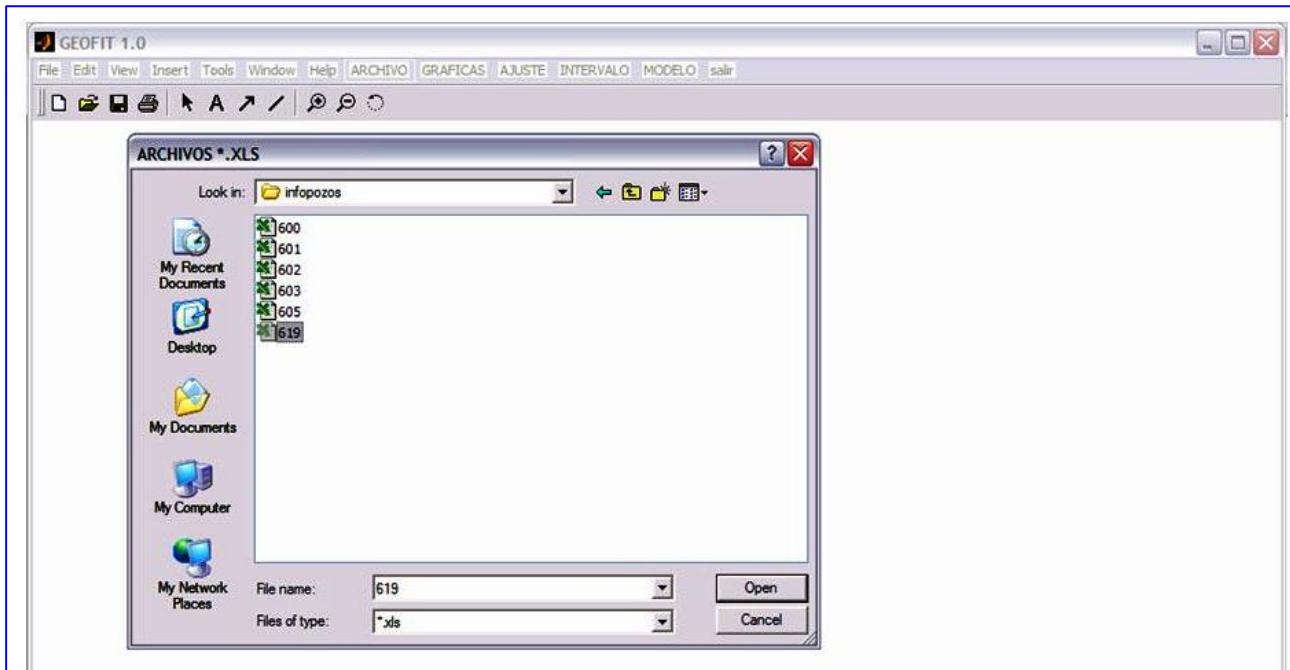


Fig. 3. Selección del archivo de datos

La opción GRÁFICAS en el menú principal permite la selección de los datos de producción a graficar, que pueden ser: apertura de separador, presión de separador, presión de cabezal, producción de mezcla, producción de agua, producción de vapor, entalpía y la temperatura. Las gráficas son presentadas en formato rectangular y se puede seleccionar si los ejes son: eje X y eje Y lineales (opción LINEAL), sólo el eje X en logaritmo en base 10 (opción LOG X), sólo el eje Y en logaritmo en base 10 (opción LOG Y) y ambos logarítmicos (opción LOGX LOGY).

El caso de las gráficas de producción de agua, vapor y mezcla se presenta también la gráfica de producción acumulada. Un ejemplo de ello se puede observar en la Figura 4, en la que se muestra la producción de vapor del pozo 619 de Cerro Prieto y su producción acumulada usando la escala lineal en ambos casos.

Con la opción AJUSTE del menú principal se activa el algoritmo de cálculo de las constantes de ajuste para la curva seleccionada. Debido a que durante la historia de producción de los pozos geotérmicos se presentan factores que pueden causar cambios abruptos en sus gráficas de producción, como en el caso que se presenta en la Figura 4, la herramienta que se presenta tiene la opción de segmentar el proceso de ajuste en intervalos definidos por el usuario según las necesidades de análisis.

Esto se presenta en la Figura 5. En ella se puede observar en la parte superior la gráfica de todos los datos de producción y en la inferior los seleccionados por el usuario. La selección del intervalo de ajuste se realiza gráficamente usando para ello el *mouse* de la computadora y definiendo los límites superior e inferior de dicho intervalo, mediante la selección de la opción INTERVALO del menú principal.

Una vez seleccionado el intervalo de interés se puede definir el tipo de modelo para realizar el ajuste por mínimos cuadrados, lo que se puede hacer con la opción MODELO del menú principal.

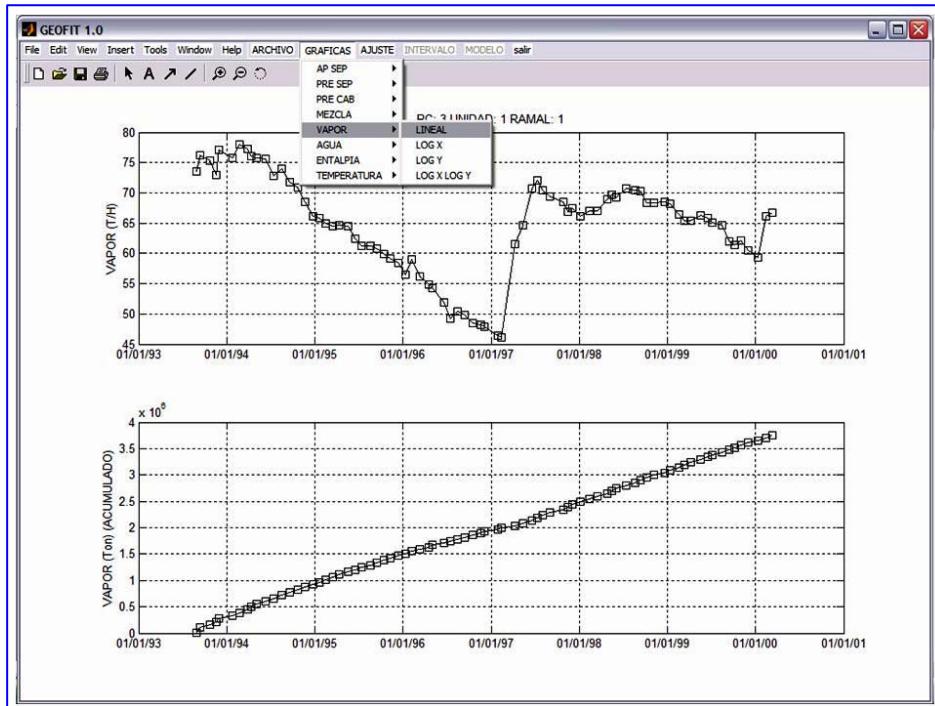


Fig. 4. Gráficas de producción

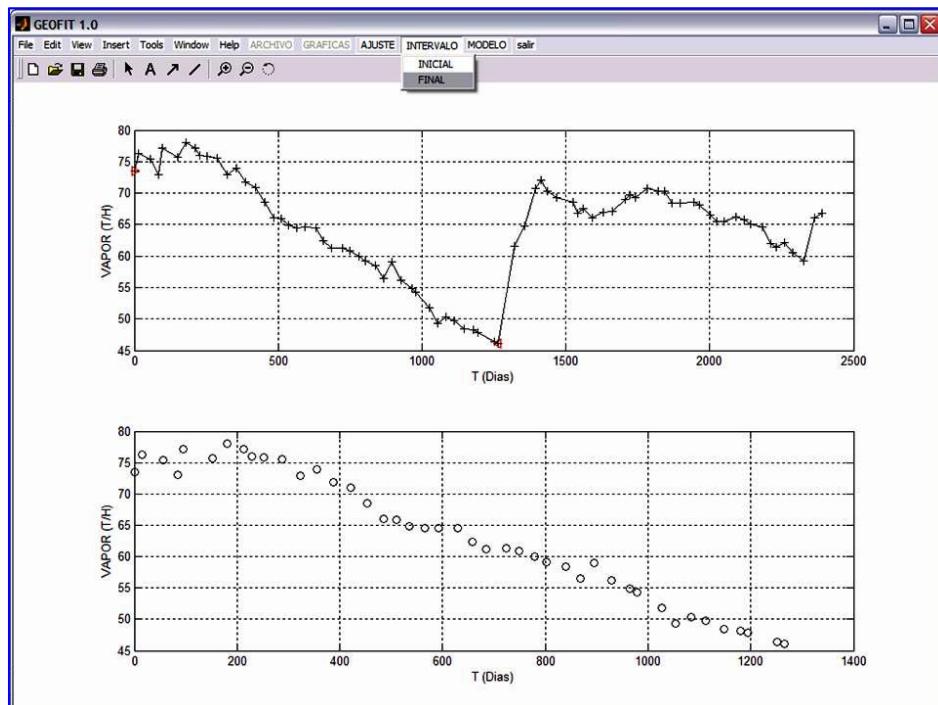
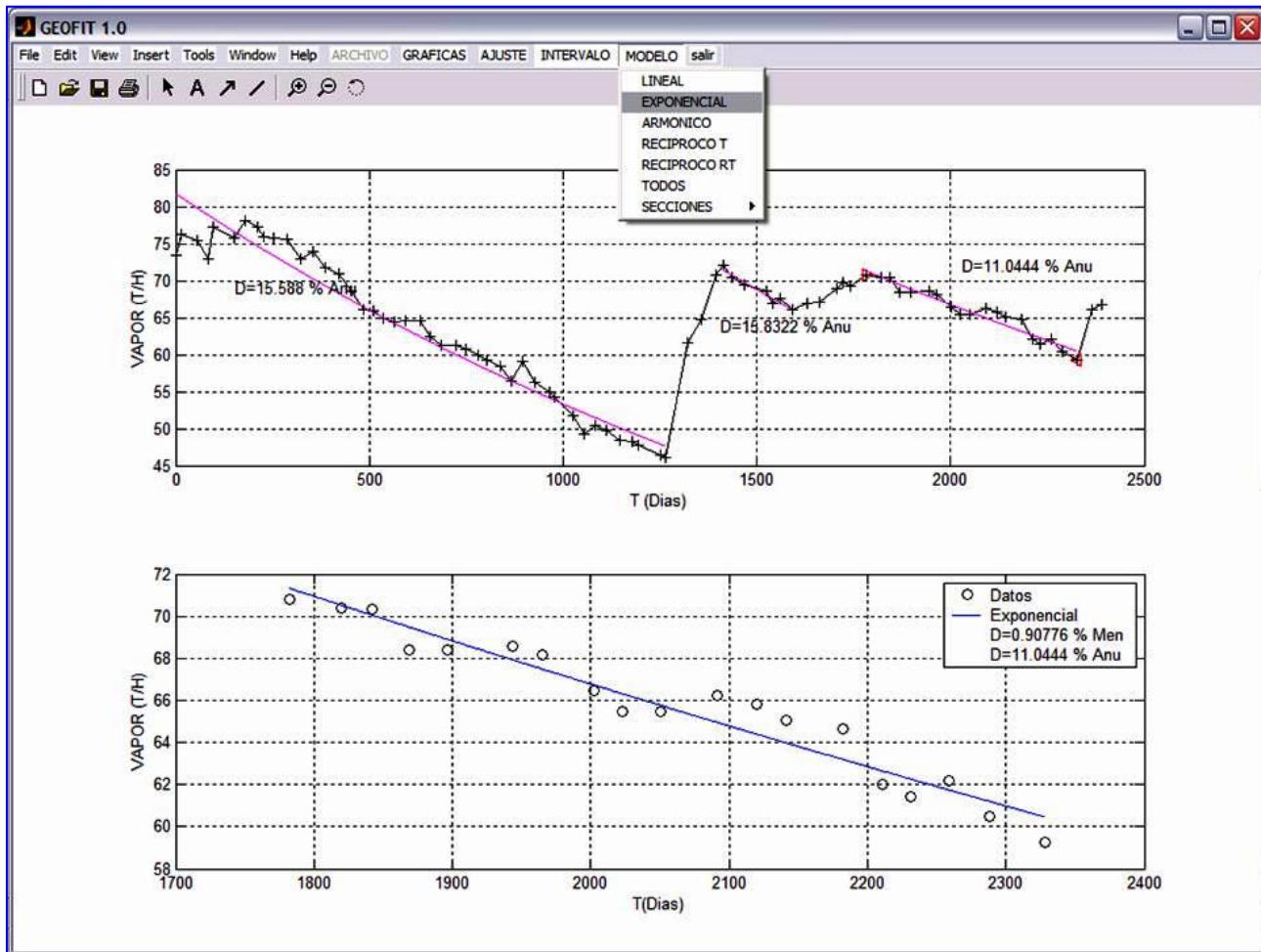


Fig. 5. Selección del intervalo de ajuste de la producción de vapor del pozo 619 del campo geotérmico de Cerro Prieto

En la Figura 6 se muestra el ajuste a los datos usando los tres modelos más ampliamente utilizados.



*Fig. 6. Ajuste usando el modelo exponencial de los datos de producción en el intervalo seleccionado por el usuario para la producción de vapor del pozo 619 de Cerro Prieto*

#### 4. Conclusiones

Es posible realizar la descripción del comportamiento de pozos geotérmicos o del mismo yacimiento a través de la aplicación del análisis de curvas de declinación debido a que estas pueden caracterizar gráficamente la eficiencia de los pozos.

La gran mayoría de los métodos tradicionales de análisis de curvas de declinación se basan en la rapidez de declinación a partir de gráficas del gasto de la producción contra el tiempo.

Los modelos matemáticos tradicionales para el análisis de curvas de producción contra el tiempo son: lineales, exponenciales, armónicos, recíprocos en el tiempo y recíproco en el gasto y algunos otros. Para el caso del campo geotérmico de Cerro Prieto, los que mejor ajuste han mostrado son el exponencial y el armónico. Actualmente se están desarrollando algunos modelos para curvas de declinación con enfoque mecanista.

Se desarrolló una herramienta de software con ambiente gráfico en MATLAB que puede ser utilizada para el análisis de tendencias de producción de pozos, la cual incorpora cinco modelos para el análisis de curvas de declinación además de permitir su presentación en cuatro formatos de ejes diferentes.

El ajuste de las tendencias productivas se realiza mediante la linealización de las curvas teóricas y el posterior ajuste con base al método de mínimos cuadrados.

Se presentó un caso de aplicación del software desarrollado al pozo productor 619 del campo geotérmico de Cerro Prieto.

## 5. Simbología

$q(t)$	Gasto de producción para cualquier tiempo.
$q_0$	Gasto de producción inicial.
$t$	Tiempo.
$D$	Rapidez de declinación de la curva de producción.
$a$	Factor de declinación exponencial.
$a_0$	Constante definida en la ecuación (4).
$m$	Pendiente de la recta definida en la ecuación (2).

## Referencias

- Arps, J.J. (1945) Analysis of Decline Curves. *Trans. AIME* 160, pp. 228-247.
- De León, J.V., J.D. Ocampo, and A. Pelayo (2001) New Tools for Reservoir Engineering in Cerro Prieto Geothermal Field. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 25, pp. 625-630.
- Enedy, K.L. (1989) The Role of Decline Curve Analysis at the Geysers. *Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS*. Vol. 13, pp. 383-391.
- Fesmire, V.R (1993) The Geysers Steam Field Decline Study. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 17, pp. 235-241.
- Fetkovich, M.J. (1973) Decline Curve Analysis Using Type Curves, *48<sup>th</sup> Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, Paper number 4629.
- Ocampo, J.D. (1997) El Pronóstico como una Herramienta Técnica para la Planeación y Control de un Proyecto Geotérmico, *Congreso Nacional de Ahorro de Energía*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

- Ocampo, J., A. Pelayo, J. de León, K. Goyal, and T. Box (1998). Reservoir Characteristics Obtained From Steam Decline Trends in the Cerro Prieto Geothermal Field". *Proceedings, Twenty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-158, pp. 27-32.
- Ocampo, J., A. Pelayo and T. Box (2000). Forecast of Steam Production for Some Cerro Prieto Geothermal Wells. *Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS*, Vol. 24, pp. 417-420.
- Ocampo D., J., and J. de Leon V. (2001) Curve Fitting Analysis of Steam Trends for Cerro Prieto Wells. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 25, pp. 624.
- Orizonte, R.G., A.E. Amistoso, and R.C. Malate (2003). Projecting the Performance of Nasuji-Sogongan Production Wells with the Additional 20 MWe Power Plant in the Palinpìnón-2 Area, Southern Negros Geothermal Production Field, Philippines. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 27, pp. 765-770.
- Puente G., H., and M.H. Rodríguez R. (1994) Cerro Prieto Steam Production Forecasting. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 18, pp. 599-603.
- Ramsay, H.J., and E.T. Guerrero (1969) The Ability of Rate-Time Decline Curves to Predict Production Rates. *Journal of Petroleum Technology*, pp. 139-141.
- Rivera, J. (1977) Decline Curve Analysis – A Useful Reservoir Engineering Tool for Predicting The Performance of Geothermal Wells. *Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS*, Vol. 1, pp. 257-259.
- Rivera, J. (1978) Application of Type Curve Procedure for the Analysis of Production Data from Geothermal Wells. *Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS*, Vol. 2, pp. 575-578.
- Sanyal, S.K., and M. Che (1982). A Sensitivity Study of the Economics Parameters for the Geysers Geothermal Field, California. *Geothermal Resources Council, TRANSACTIONS*, Vol. 6, pp. 43-46.
- Sanyal, S.K., E.C. Hennerberg, and P.J. Brown (1989a). Economics Analysis of Steam Production at the Geysers Geothermal Field, California. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 13, pp. 423-430.
- Sanyal, S.K., A.J. Menzies, P.J. Brown, K.L. Enedy, and S. Enedy (1989b). A Systematic Approach to Decline Curve Analysis for the Geysers Steam Field, California. *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, Vol. 13, pp. 430-437.