

## **Alternativas tecnológicas multidisciplinarias enfocadas a consolidar productividad en yacimientos geotérmicos**

**Javier Ballinas Navarro**

HYGT Chemical de México, Reynosa, Tams. Correo: [javierbn10@hotmail.com](mailto:javierbn10@hotmail.com)

### **RESUMEN**

La tecnología es la aplicación de la mente humana al proceso enfocado de encontrar una nueva o mejor opción. La adopción de tecnologías modernas e innovadoras para impulsar la extracción eficiente de vapor es un reto permanente. La investigación, implementación y ejecución en el campo de tecnologías direccionadas a consolidar productividad son puntos clave para la correcta explotación de un campo geotérmico. Actualmente están disponibles tecnologías multidisciplinarias, algunas ya en México y otras a nivel internacional, para mejorar el potencial productivo de yacimientos geotérmicos. Es necesario reconocer los daños presentes en la formación, y de ahí seleccionar en la cartera tecnológica de soluciones la mejor opción para iniciar, restaurar o incrementar la producción de vapor. Los objetivos de la aplicación de técnicas multidisciplinarias son vencer retos paradigmáticos y alcanzar metas viables, aplicando las fortalezas de todas ellas, maximizando producción, reduciendo costos y acelerando el retorno de inversiones. Este trabajo técnico analiza las siguientes opciones tecnológicas: la micro-sísmica, técnica para detectar el azimut y condiciones geométricas de fractura, el sistema de inyección por pulsos para optimizar la impregnación en la roca del fluido estimulante, un sistema integral de estimulación inteligente sin necesidad de inhibidores de corrosión, adición de aditivos quelantes para mejorar la condición reactiva de ácidos a alta temperatura, la técnica de inyección por inter-digitación para la inducción múltiple de canales conductivos en el yacimiento tratado, la aplicación de nitrógeno gaseoso para divergencia en caso de estimular espesores mayores de 20-25 metros y un sistema propelente para inducir mini-fracturas al yacimiento. La aplicación de cada tecnología depende de la naturaleza de los daños presentes en formación, siendo posible aplicarlas individualmente o bien de manera integral o simultánea, según las necesidades detectadas en el yacimiento(s) por ser tratado(s). Es definitivo que se optimizará la relación beneficio/costo al inducir en los yacimientos geotérmicos la manifestación total de su potencial productivo. El trabajo presenta trabajos de aplicaciones de estas tecnologías en Los Humeros, Cerro Prieto, Los Azufres y Domo de San Pedro en Nayarit, así como algunos ejemplos a nivel internacional.

*Palabras clave:* Tecnologías multidisciplinarias, micro-sísmica, inyección pulsante, sistema de estimulación inteligente, quelantes, interdigitación, nitrógeno, divergencia, propelente.

### **Multi-disciplinary technological alternatives aimed to consolidate productivity in geothermal reservoirs**

### **ABSTRACT**

Technology is the application of the human mind to the process focused on finding a new or better option. The adoption of modern and innovative technologies to promote the efficient extraction of steam is a permanent challenge. The research, implementation and execution in the field of technologies aimed at consolidating productivity are key points for the correct exploitation of a geothermal field. Currently, multidisciplinary technologies are available, some already in Mexico and others at international level, to induce in a high percentage the productive potential of geothermal reservoirs. It is necessary to recognize the damages present in training, and hence to select in the technology portfolio of solutions the best option to start, restore or increase steam production. The

objectives of applying multidisciplinary techniques are to overcome paradigmatic challenges and achieve viable goals, applying the strengths of all of them, maximizing production, reducing costs and accelerating the return of investments. This paper analyzes the following technological options: micro-seismic, techniques to detect the azimuth and geometric conditions of a fracture, the pulsed injection system to optimize rock impregnation of the stimulating fluid, an integral intelligent stimulation system without the need for corrosion inhibitors, addition of chelating additives to improve the reactive condition of acids at high temperature, fingering injection technique for the multiple induction of conductive channels in the treated reservoir, the application of gaseous nitrogen for divergence in case of stimulating thicknesses greater than 20-25 meters and a propellant system to induce mini-fractures to the reservoir. The application of each technology depends on the nature of the damages present in the formation, being possible to apply them individually or in an integral or simultaneous way, according to the needs detected in the reservoir(s) to be treated. Is definitive that the benefit/cost ratio will be optimized by inducing in the geothermal reservoirs the total manifestation of its productive potential. This paper presents applications of these technologies in Los Humeros, Cerro Prieto, Los Azufres and Domo of San Pedro in Nayarit, as well as some examples at international level.

**Keywords:** Multidisciplinary technologies, micro-seismic, pulsating injection, intelligent stimulation system, chelating, fingering technique, nitrogen, divergence, propellant.

## 1. Introducción

La aplicación de tecnologías multidisciplinarias innovadoras en forma individual o en interacción tiene una alta posibilidad de aprovechar el potencial productivo de un yacimiento geotérmico. Es necesario el conocimiento pleno de las condiciones litológicas y de las estructurales de la formación de interés, su petrofísica y la identificación de posibles daños para seleccionar dentro de la cartera de opciones, las tecnologías más viables para una correcta explotación y extracción máxima del vapor in-situ.

Tomando en cuenta los objetivos mencionados, es vital conectar el yacimiento geotérmico al fondo del pozo y optimizar el flujo de vapor a superficie. La contribución de la investigación, los avances científicos y el desarrollo tecnológico es determinante para la explotación adecuada de los recursos geotérmicos.

En el caso de la industria geotérmica, existen algunos sectores operativos con tecnologías consolidadas, otras en proceso de implementación y algunas en desuso por resultados pobres. Las tecnologías que se revisan en este trabajo se encuentran incluidas en uno o más grupos de la siguiente clasificación:

- a) Tecnologías con valor agregado
- b) Tecnologías enfocadas a inducción de eficiencia
- c) Tecnologías de alta rentabilidad, reductoras de costos operativos

## 2. Micro-sísmica en pozos

La tecnología de microsísmica detecta básicamente el azimut (dirección) de un fracturamiento dentro de la formación tratada (Figura 1; todas las figuras al final del texto). Su instrumentación y equipo ha sido adaptado a temperaturas geotérmicas. Es de suma importancia visualizar (después de un complicado análisis geofísico), la orientación de la fractura inducida, pues permite valorar la efectividad del trabajo realizado, optimizar diseños de operaciones similares y apoyar decisiones relevantes en la administración y desarrollo de un campo geotérmico (Reyes-Montes et al., 2009).

Recientemente, la tecnología microsísmica se ha desarrollado en forma significativa y ya no requiere de un pozo observador para emisión de señales de banda ancha y de otros espectros. Ahora la microsísmica se puede realizar únicamente en el pozo tratado, utilizando diferentes arreglos de sensores emisores/receptores así como de geófonos.

### 3. Inyección por Pulsos

Esta opción tecnológica de inyección pulsante, de aplicaciones primarias en el ámbito petrolero, es definitivamente una importante alternativa para operaciones de estimulaciones químicas realizadas con TF (tubería flexible), pues permite una óptima impregnación del fluido estimulante sobre la roca tratada y además induce una mayor penetración del sistema ácido a condiciones de yacimiento-dentro (Figura 2).

Es de hecho una herramienta-jet con varios puertos de salida (ya adaptado a condiciones geotérmicas), la cual induce una inyección a chorro del sistema estimulante prácticamente a 360°, lo cual asegura una óptima impregnación en el yacimiento estimulado y además, una alta penetración del fluido en el yacimiento de interés, lo cual es una ventaja relevante (Samuel and Sengul, 2003).

Esta tecnología no tiene electrónica de fondo, lo cual es una gran ventaja pues prácticamente el jet oscila con la misma energía cinemática inducida por el gasto de inyección, aun a gastos bajos, del orden de 1 a 5 bpm (barriles por minuto; un barril contiene 42 galones o aproximadamente 159 litros) es decir, es un procedimiento totalmente mecánico.

Esta circunstancia también implica recuperar a condiciones de fondo de pozo las pérdidas de presión por fricción en el cuerpo interior de la TF durante el bombeo del fluido. En mecánica de fluidos, el fenómeno que origina la inyección por pulsos, es definido como un *momentum* ( $F \times D$ ), equivalente a fuerza por distancia, en donde F sería la presión de inyección y D el radio de invasión del fluido estimulante.

### 4. Sistema de Estimulación Integral

Un problema añejo en los procesos de estimulación de yacimientos geotérmicos, es el fenómeno de corrosión que suele presentarse en tanques de almacenamiento, bombas de los equipos, líneas de inyección y especialmente en las tuberías de revestimiento, tuberías cortas (*liners*) y aparejos de producción del pozo cuando este es estimulado mediante acidificación.

Pero recientemente se ha desarrollado un sistema de estimulación integral especialmente diseñado para rocas ígneas y volcánicas, que prácticamente no requiere incorporar aditivos especiales, en particular el agente inhibidor y el aditivo reforzante de la inhibición. El sistema actúa fundamentalmente sobre sílice, cuarzo y minerales arcillosos en general.

El sistema se puede usar en fracturamientos acidificados. Tiene la particularidad de una alta velocidad de reacción con las rocas, situación que algunas veces debe controlarse mediante el ajuste de la concentración de iones reactivos en el sistema, pues es necesario alcanzar un adecuado radio de invasión a condiciones yacimiento-dentro (Figura 3).

Este sistema tiene notables ventajas, tomando como referencia la relación beneficio/costo que se puede alcanzar, así como otras importantes ventajas operativas que ofrece el manejo de un fluido estimulante eficaz y seguro en cuanto al tema de inhibición, calibrado para trabajar hasta temperaturas del orden de 300°C.

## **5. Aditivos quelantes**

Manejar sistemas ácidos más aditivos a temperaturas geotérmicas, es particularmente complicado. Estos sistemas requieren manejar efectos sobre la velocidad de reacción del sistema fluido estimulante/roca, la capacidad de disolución sobre los minerales de la roca y, desde luego, la estabilidad del sistema estimulador.

Los aditivos quelantes, de origen petrolero, precisamente se usan en situaciones de altas temperaturas en el fondo del pozo, para estabilizar a la solución ácida y controlar a la velocidad de reacción y la disolución en la roca (Islas, 1991). Estos agentes también ayudan a controlar los efectos corrosivos de fluidos estimulantes ácidos en ambientes de alta temperatura (Figura 4).

De hecho, los agentes quelantes o secuestrantes evitan la precipitación de los metales en soluciones acuosas y mitigan reacciones oxidativas. Esta función adquiere gran importancia al trabajar con tuberías de revestimiento viejas y aparejos de producción ya con uso excesivo.

## **6. Tecnología de Inter-digitación**

La técnica de estimulación por inter-digitación involucra la percolación de un fluido con baja viscosidad dentro de otro fluido marcadamente más viscoso, dentro de un medio poroso. En consecuencia, el fluido delgado (o menos viscoso) se intercala en el cuerpo del fluido viscoso en perfiles dinámicos que forman 'dedos', de donde obtiene su nombre la tecnología (Figura 5).

La tecnología de inter-digitación maximiza el tiempo de contacto del ácido con la cara de la formación, lo que induce diversos canales conductivos de flujo para el vapor. Por otra parte, permite que algunas zonas permanezcan sin contacto con el ácido reactivo ligero, las cuales sirven como soporte para mantener abiertos los canales conductivos recién generados, ayudando al soporte del esfuerzo de sobrecarga.

Los fluidos utilizados en esta tecnología ya están calibrados para yacimientos y temperaturas geotérmicas. La sumatoria individual de la conductividad de todos los canales de flujo inducidos es mayor a la magnitud de una sola conductividad con un solo canal de flujo. El desplazamiento inmiscible se ve afectado por el medio poroso, las dimensiones de los 'dedos' hidráulicos, el gasto de inyección y la dispersión hidrodinámica que a su vez depende de la velocidad (Bastian, 1999).

## **7. Nitrógeno como divergente**

Frecuentemente se localizan una serie de intervalos de interés contenidos en un gran espesor de formación en un pozo geotérmico, del orden de 300 a 800 m. En estos casos se vuelve complicado estimular todo el espesor con una estimulación matricial ácida.

Es esas condiciones, es necesario desviar el flujo hacia cada uno de los intervalos de interés, es decir, es preciso divergir el fluido estimulante y su gasto de inyección. Para tal propósito existen varios divergentes: agentes granulares, geles de alta viscosidad base agua o ácida y espumas binarias (nitrógeno y agua). La espuma binaria es la más efectiva, siendo muy útil incluso en ambientes de alta temperatura (Bernardiner et al., 1992) (Figura 6).

Consecuentemente, en varios tratamientos acidificados para yacimientos múltiples se ha usado la espuma base N<sub>2</sub> con excelentes resultados, confirmados por las respuestas en la producción de

vapor de los pozos así tratados.

Los yacimientos múltiples, con varios intervalos de interés, normalmente se estimulan de abajo hacia arriba, inyectando en cada intervalo la fase espumosa inmediatamente después de la fase ácida. Así, la espuma bloqueará temporalmente el intervalo tratado, actuando como un tapón y logrando así dirigir el flujo del fluido estimulante hacia el intervalo superior inmediato.

De esta manera, se asegura tratar la mayor parte del espesor de interés, que es la suma de todos los espesores de cada intervalo particular, diseñando adecuadamente el gasto de inyección del sistema ácido estimulante. Por lo tanto, se pueden alcanzar así saturaciones correctas de ácido en todos los yacimientos involucrados.

## **8. Sistemas propelentes**

De origen petrolero, los propelentes han evolucionado hacia aplicaciones en la industria geotérmica. La opción considerada es una pistola encamisada con material sólido propelente, disponible en varios diámetros, la cual se puede bajar con cable eléctrico, tubería de trabajo o bien, TF (ver Figura 7).

Cuando el propelente recibe la señal eléctrica o equivalente, el calor y el choque asociado en el evento de ignición del propelente, crean rápidamente una nube de gas a alta presión. La propagación y la magnitud del pulso de presión es superior al esfuerzo tensional de la formación así como a la resistencia de cualquier material obturante, pero es inferior a las magnitudes de los esfuerzos que controlan la estabilidad del yacimiento (Yang, 2000).

El empleo de propelentes definitivamente produce fracturamiento en la roca. En diseños efectuados en un programa de cómputo asociado, se inducen varias mini-fracturas. Por tanto, en formaciones poco dañadas y/o con una zona alterada reducida, la acción del propelente puede ser suficiente para mejorar las condiciones del pozo.

Pero en yacimientos fuertemente dañados y con alta penetración en zona alterada, se puede utilizar primero el propelente para generar mini-fracturas, hasta del orden de un metro de penetración, y utilizar después una operación de fractura ácida, la cual seguramente seguirá la orientación de las mini-fracturas iniciales y generará una fractura de excelente penetración, caracterizada por caídas bajas de presiones friccionales y tortuosidad.

## **9. Ejemplos de aplicaciones en campo**

a) En el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, bajo un contrato marco de reparación de pozos, en el año 2013 se usó espuma de nitrógeno como divergente en estimulaciones ácidas matriciales. En este caso se habían localizado entre 8 y 10 intervalos de interés en cada pozo, con un espesor total de 50 m en cada uno de ellos. Se utilizó TF, y se obtuvieron buenos resultados al mejorar la producción de vapor en los pozos tratados con esta técnica.

b) En el campo del Domo San Pedro, Nay., se empleó otro divergente en el año 2014, que fue un gel ácido con alta viscosidad. Las circunstancias fueron similares a las señaladas en el ejemplo anterior de Cerro Prieto. Durante los primeros meses después de la estimulación con fracturamiento acidificado y divergente, se obtuvo un aumento promedio de 15% en la producción de vapor de los pozos tratados. En este caso, la roca objetivo fue una granodiorita.

c) En los dos campos mencionados, Cerro Prieto y Domo San Pedro, se aplicó también la

tecnología de inyección pulsante y otras con sistema de chorro natural, con TF en el primer campo y con tubería de perforación en el caso del Domo San Pedro. La Impregnación adecuada de fluidos estimulantes en la roca y su alto radio de invasión a condiciones yacimiento-dentro contribuyeron sin duda alguna a mejorar la producción de vapor de los pozos de ambos campos.

d) La tecnología de microsísmica todavía está en fase de prototipo de demostración en el mercado geotérmico, pero así ha sido probada recientemente en pozos geotérmicos de Italia, y sin duda pronto estará adaptada plenamente a las altas temperaturas geotérmicas.

e) En algunas ocasiones aisladas se ha empleado un sistema estimulante integral con poca o nula necesidad de utilizar inhibidores en campos geotérmicos de Costa Rica y Guatemala. Sus resultados aún están valorizándose. Pero este sistema, por las significativas ventajas que ofrece, tiene un prometedor futuro. En México, se espera su pronta implementación después de obtener el registro de la marca, y se espera aplicarlo tanto en la industria petrolera como en la geotérmica, debidamente adaptado a cada caso.

f) La opción de inyección inter-digitada en estimulaciones de formaciones geotérmicas se aplicó en 2012-2014 en pozos de los campos de Los Humeros, Pue., Los Azufres, Mich., Domo San Pedro y Cerro Prieto, obteniendo mejoras adecuadas en la producción de vapor. En algunos diseños se agregaron aditivos quelantes.

g) En algunas operaciones específicas, realizadas en 2015 y 2016 en campos geotérmicos de Filipinas y El Salvador, se han aplicado sistemas propelentes, observándose una baja sensible en las presiones de inyección en estimulaciones ácidas, debido al descenso de la presión friccional y la tortuosidad. Con ello se mejoró el radio de invasión del fluido estimulante, y se obtuvieron mejoras en la producción que han durado más tiempo con respecto al promedio general.

h) Todas esas tecnologías multidisciplinarias han mejorado la explotación de los yacimientos geotérmicos tratados, como se puede observar en los análisis nodales de algunos de ellos, como el mostrado en la Figura 8.

## **10. Conclusiones**

- Es una necesidad permanente la adopción e implementación en campo de tecnologías modernas e innovadoras para incrementar la extracción de vapor, aprovechando al máximo el potencial del yacimiento geotérmico.
- Este trabajo técnico presenta varias tecnologías multidisciplinarias enfocadas a ello, que logran mejorar la producción de vapor en superficie. Ellas pueden emplearse en forma individual o bien en combinación.
- La tecnología de microsísmica va dirigida a la optimización del diseño de fracturamientos acidificados, y al apoyo en la toma de decisiones en el desarrollo y la administración de campos geotérmicos.
- La inyección pulsante al yacimiento considerado es una excelente opción, la cual permite una excelente impregnación del ácido estimulante en el yacimiento geotérmico y en consecuencia directa, un incremento del radio de invasión a condiciones yacimiento-dentro.
- Desde hace décadas, el problema de corrosión ha sido un gran obstáculo en la acidificación de



yacimientos geotérmicos. El sistema estimulante integral es una excelente opción para contrarrestar esta situación, cuyo prototipo ya fue probado en Centroamérica y pronto estará disponible en México.

- El uso de propelentes en yacimientos geotérmicos con daño relativo puede reemplazar la estimulación ácida bajo ciertas circunstancias. Pero los propelentes también pueden utilizarse en formaciones altamente dañadas, pues es posible inducir primero mini-fracturas del orden de un metro de penetración, y posteriormente complementar el tratamiento con una estimulación o fractura ácida.
- Los aditivos quelantes favorecen la estabilidad de sistemas ácidos a condiciones de alta temperatura, mejorando su capacidad reactiva con los minerales de la formación tratada e incrementando su radio de penetración en el yacimiento, controlando la velocidad de reacción del sistema fluido estimulante/formación.
- Cuando los pozos geotérmicos presentan un gran espesor de interés dentro del cual se han identificado varios intervalos de interés, es estrictamente necesario desviar el flujo del fluido estimulante, mediante una divergencia. La espuma binaria ( $N_2$  y agua) es reconocida como la mejor opción a usar divergente, habiéndose empleado exitosamente en México.

## Referencias

- Bastian, P., 1999. *Numerical Computation of Multiphase Flow in Porous Media*. Heidelberg University, Germany.
- Bernadiner, M.G., K.E. Thompson, and H.S. Fogler, 1992. Effect of foams used during carbonate acidizing. *SPE Production & Engineering*, Vol. 7, pp. 305-356.
- Islas-Juárez, C., 1991. *Manual de Estimulación Matricial de Pozos Petroleros*. Publicación del Colegio de Ingenieros Petroleros de México, AC. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/80996506/Manual-de-Estimulacion-Matricial-de-Pozos-Petroleros>
- Reyes-Montes, J.M., W.S. Pettit and R.P. Young, 2009. Enhancement of Fracture Network Imaging from Microseismic Monitoring of Hydraulic Fracturing Treatments. *Canadian Society of Exploration Geophysicists Microseismic Workshop*, Calgary, November 2009.
- Samuel, M., and M. Sengul, 2003. Stimulate the Flow. *Middle East & Asia Reservoir Review*, No. 3, pp. 40-53.
- Yang, D.W., 2000. Propellant Gas Fracturing, Principle, Control and Application. PhD Dissertation, Stavanger University, Norway. Inédito.

## FIGURAS EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES

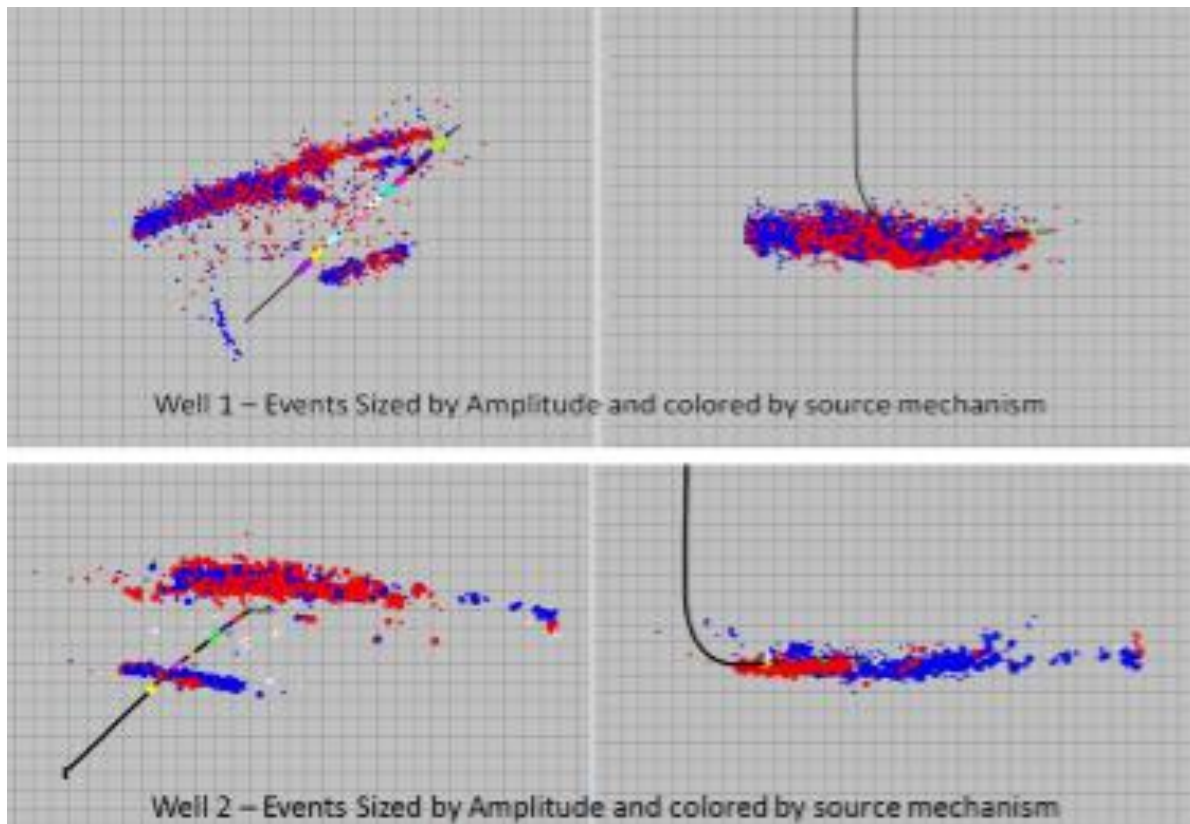


Fig.1. Aplicación de Microsísmica para detectar la orientación de un fracturamiento hidráulico.

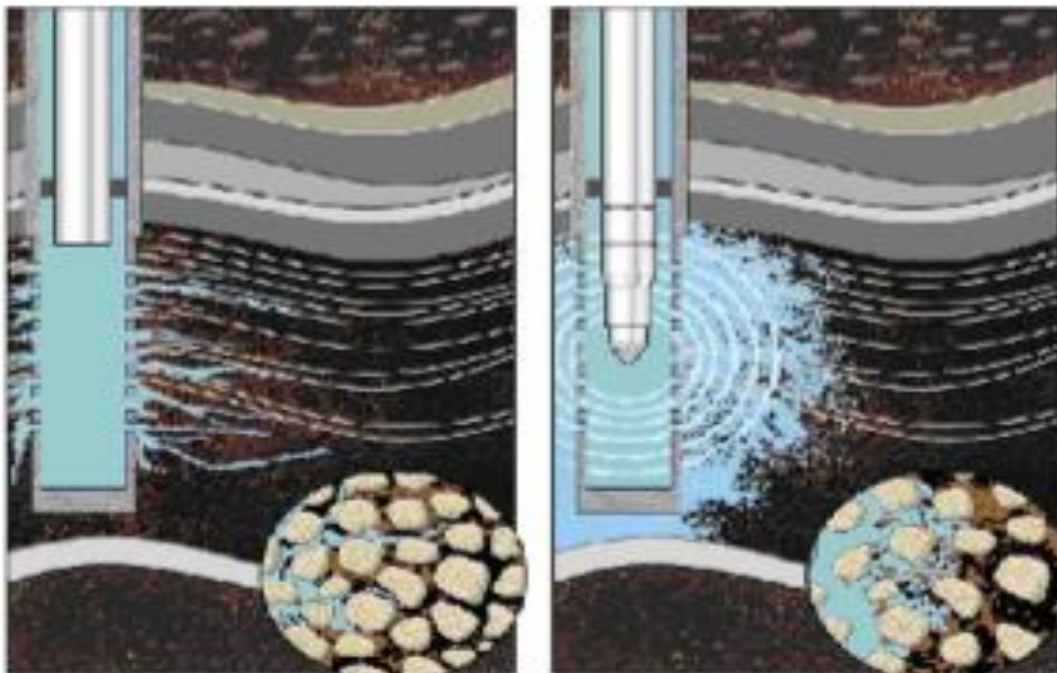


Fig. 2. Impregnación mejorada en un yacimiento geotérmico tratado con la tecnología de inyección pulsante.



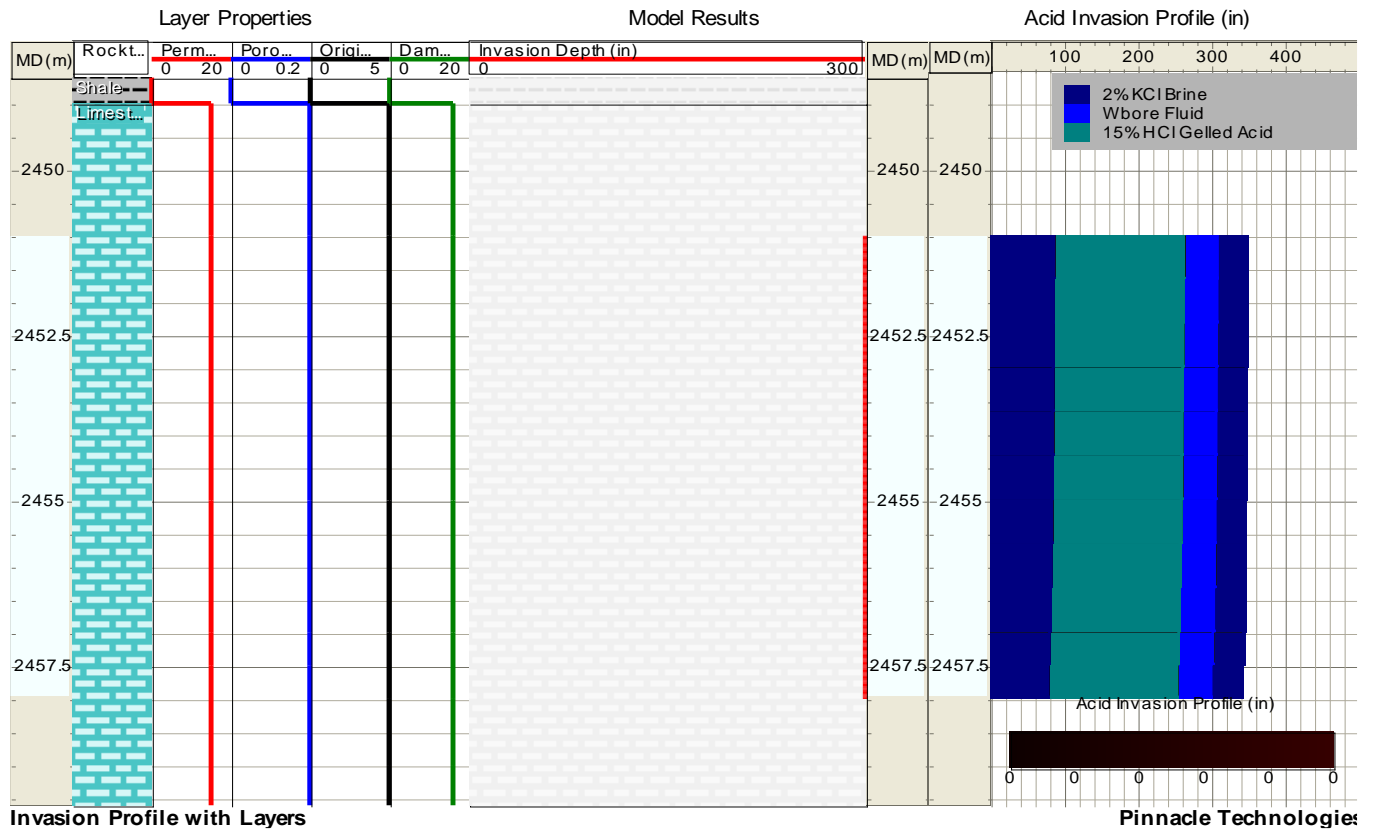


Fig. 3. Radio de invasión del fluido estimulante (gráfica de programa de cómputo).

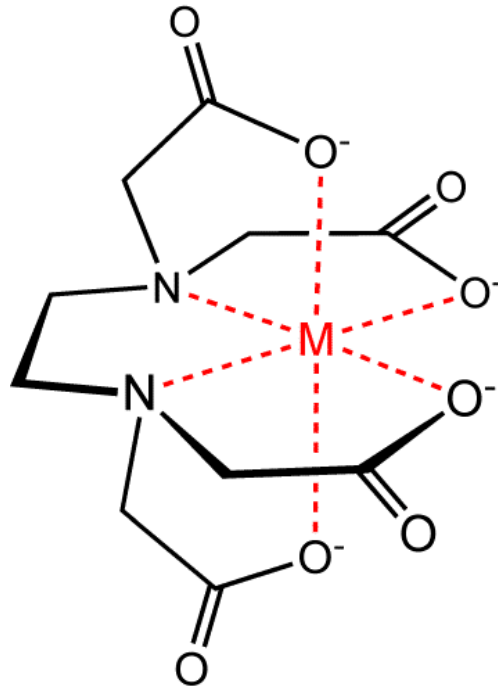


Fig. 4. Combinación metal- EDTA = Quelante.

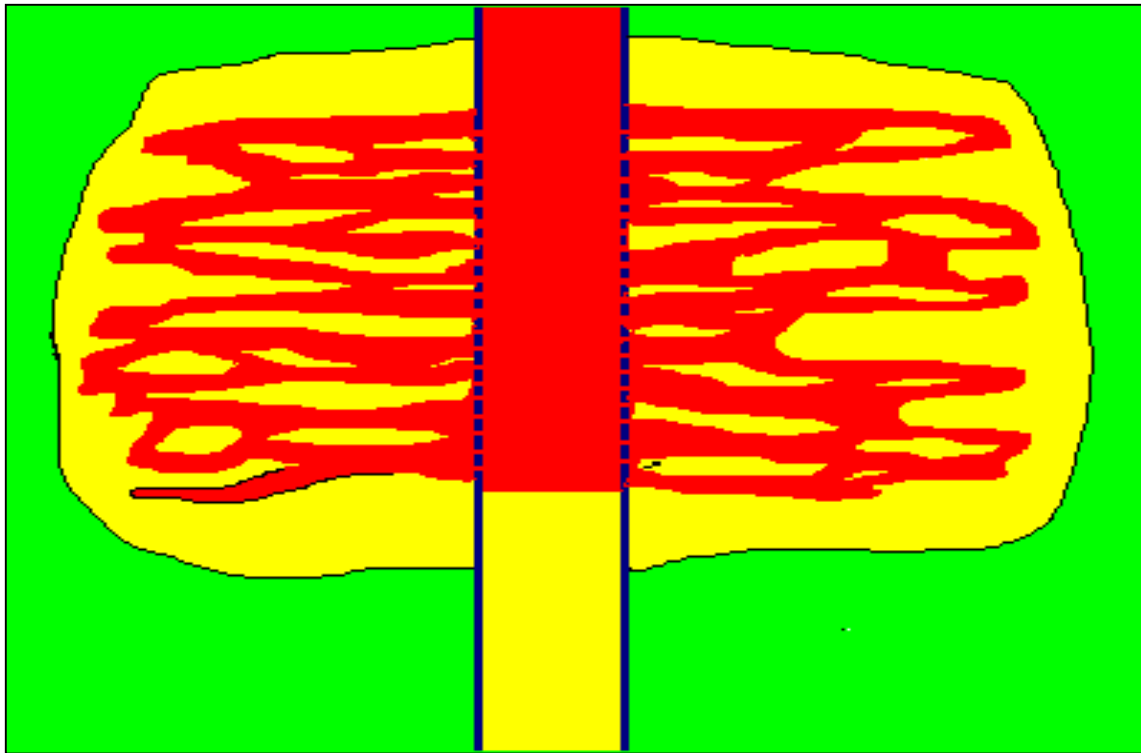
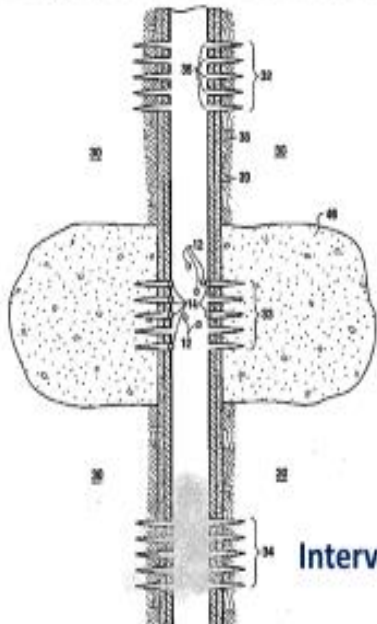


Fig. 5. Perfil en inyección con la técnica de inter-digitación.

**Divergente :**  
**Espuma Base Nitrógeno con calidad entre 70-80%**



**Intervalo estimulado y bloqueado con espuma**

Fig. 6. Divergencia con espuma binaria.

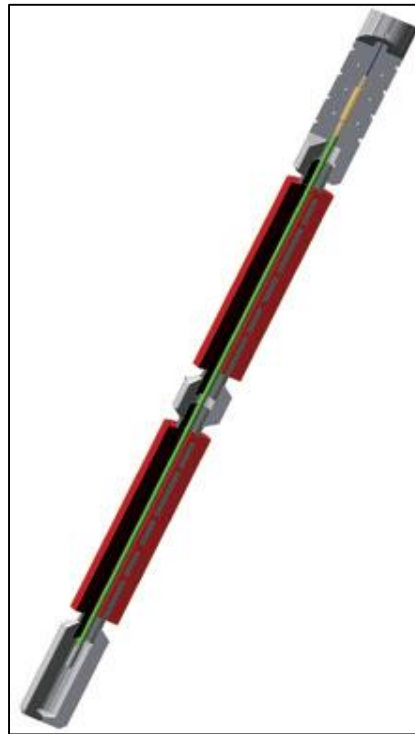


Fig. 7. Sistema con camisa propelente sujeta a combustión.

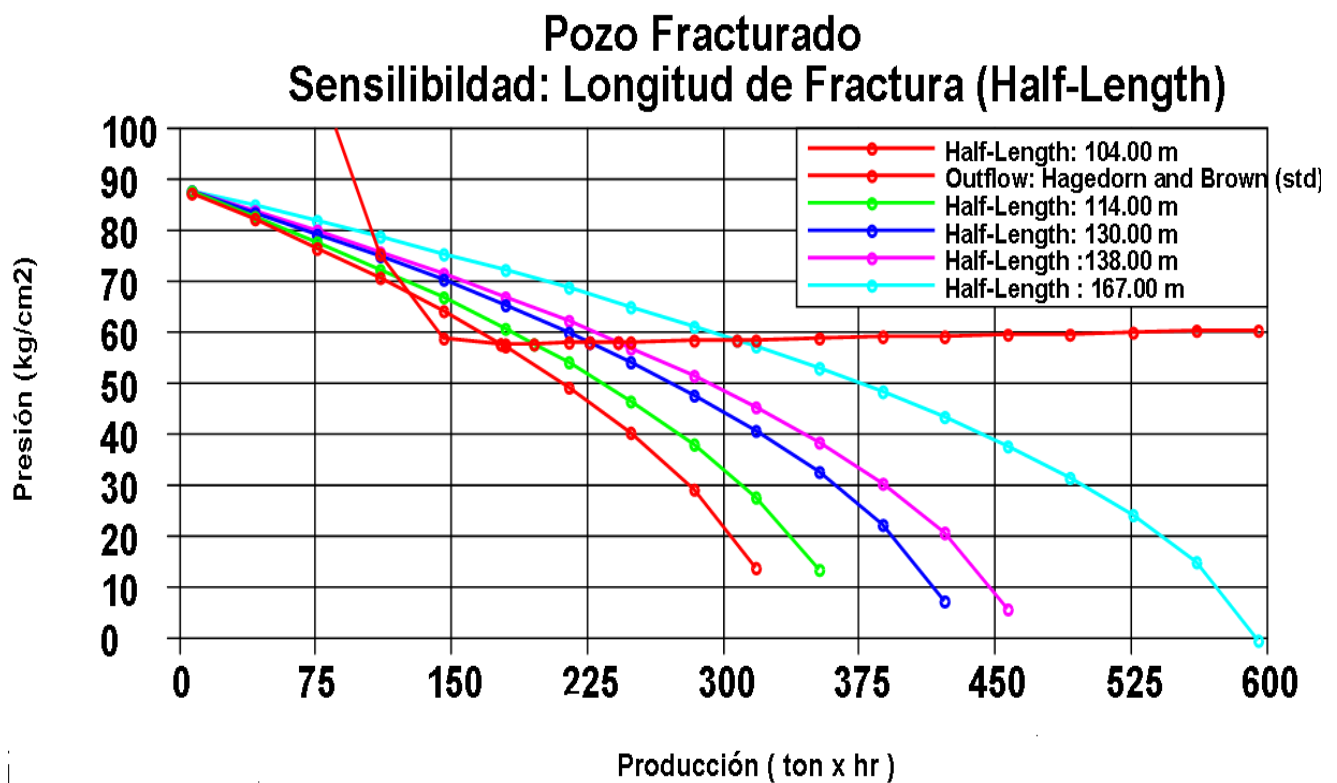


Fig. 8. Análisis nodal de un pozo de Los Azufres, Mich., para diseño de fracturamiento ácido.