

Ensayos de polimerización y depósito de sílice, pruebas de radiotrazadores y simulación numérica en el campo geotérmico de Berlín, El Salvador, Centroamérica

Marlon R. Castro Fuentes¹, Dina López², Jaime A. Reyes López¹ y Jorge Ramírez Hernández¹

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. ²Ohio University. Athens, Ohio.
Correos: mcastrosv@yahoo.com, lopezd@ohio.edu, jaime@iing.mx.uabc.mx

Resumen

El campo geotérmico de Berlín, El Salvador, empezó a explotarse para generar electricidad en febrero de 1992. Desde entonces, el total de las aguas residuales producidas, que es de aproximadamente 350 kg/s, es inyectado al reservorio del mismo campo. La inyección es la única opción factible para este campo, pero la incrustación de sílice en el reservorio ha provocado la disminución de la capacidad de aceptación de los pozos inyectoros. La temperatura promedio del agua que se inyecta en caliente es actualmente de 175° C con un pH promedio de 6.5. Con las nuevas condiciones impuestas por el proceso de generación a ciclo binario, las aguas residuales se inyectarán a una temperatura de 140° C con un pH de 5.75, con lo que se evitará la precipitación de sílice dentro del sistema de ciclo binario, del sistema de acarreo y en los pozos inyectoros. La temperatura del reservorio a la cual se inyecta el agua, está entre los 200 y 280° C. Se realizó la simulación numérica del proceso de enfriamiento del agua de la zona de producción del reservorio equilibrada con el cuarzo, así como las mezclas de agua de inyección con la de producción. Para ello se utilizaron los programas SOLVEQ y CHILLER. Los resultados muestran que la masa de cuarzo precipitado dentro del reservorio por unidad de masa reinyectada depende fuertemente de la concentración inicial de sílice del agua inyectada. La temperatura y fracción de mezcla no parecen causar ningún efecto si el reservorio está a una temperatura mayor que el agua reinyectada. Se presentan los resultados de las simulaciones del proceso de mezcla entre las aguas del reservorio y las inyectadas, tanto bajo las condiciones actuales como las futuras. Estos muestran que aunque el cambio en la temperatura del agua de inyección bajara 35° C, la cantidad de cuarzo que precipitaría (considerando las futuras condiciones de inyección) no sería demasiado diferente de la masa de cuarzo que está precipitando con la temperatura de inyección actual. Se esperaría una diferencia máxima del 15% en el porcentaje de poros tapados. Sin embargo, considerando un radio de 10 m, las simulaciones muestran que después de diez años una gran proporción de la zona de absorción se taponaría para todos los escenarios, y probablemente el pozo no sería muy útil, ya que su capacidad de aceptación disminuiría de un 43 a un 50%. Los resultados experimentales de polimerización y depósito de sílice, así como pruebas realizadas con radiotrazadores, permiten realizar el cálculo del tiempo de polimerización y precipitación, así como de la velocidad del agua reinyectada al reservorio. Esta información se utilizó para calcular el área o radio de influencia alrededor de los pozos que podría ser afectada por incrustación de sílice. Utilizando la mayor velocidad a la que se encontró que se mueve el agua de acuerdo con las pruebas de radiotrazadores, se obtuvo un radio de influencia máximo de 72 m. Sin embargo, sólo una porción muy pequeña del agua inyectada alcanza la velocidad más alta. Se calculó, por tanto, un radio más representativo, empleando la velocidad media del movimiento de agua entre los pozos, el cual resultó ser de 9 m. Así, la zona afectada podría tener un área con un radio que va desde unos centímetros hasta 9 m. La comparación de esos resultados con el modelado geoquímico, muestra que para el campo geotérmico de Berlín un área de incrustación por sílice de 10 m alrededor de los pozos provocaría una reducción de porosidad de un 4% a un 5% por año, o de aproximadamente un 30% en seis años. Si fuese más pequeño, el pozo se taponaría en un tiempo más corto, como lo que probablemente pasó en el pozo TR-1A en 1999. Estos

resultados muestran que los experimentos de campo y los modelados geoquímicos pueden ayudar a predecir o evaluar la incrustación por sílice en los pozos de inyección y establecen una base para un modelado completo de flujo de aguas subterráneas, transporte de solutos y reacciones químicas de paso. Como la obstrucción de los poros parece ocurrir en las proximidades de los pozos, las interacciones hidráulicas pueden explicar la declinación abrupta en la capacidad de inyección de los pozos, como el TR-14, cuando entran en operación pozos cercanos.

Palabras clave: Berlín, El Salvador, geoquímica, sílice, radiotrazadores, modelado.

Polymerization and silica deposition studies, and radiotracer tests and numerical modeling in the Berlín geothermal field, El Salvador, Central America

Abstract

Generation of electricity in the Berlín Geothermal Field in eastern El Salvador started in February 1992. All residual waters (~350 kg/s) produced during the process have been injected in this field, the only feasible field option. However silica scaling problems in the reservoir decrease the capacity of the wells to absorb water. Presently, the temperature of the injected waters in the hottest zone is 175° C and the average pH is 6.5. The new binary cycle unit that will generate electrical energy from the steam-separated waters of the Berlín geothermal field will produce residual waters with temperatures of 140° C and a pH of 5.75. Precipitation of silica minerals will be avoided in the superficial piping system and the injection wells. The reservoir temperature at the injection zone ranges from 280° C to 200° C. Modeling cooling of the hot, reservoir waters in equilibrium with quartz and mixing with injection waters was done using the programs SOLVEQ and CHILLER. Results show that the mass of quartz precipitated within the reservoir per unit mass of injected water strongly depends on the initial silica concentration of the injected water. The temperature and mixing fraction of the reservoir does not seem to have a deep effect if the reservoir is at a higher temperature. Modeling results are shown for the processes of mixing reservoir waters and injection waters under actual and future conditions. The simulation results show that even when the change in the injection brine temperature is around 35° C, the amount of quartz precipitated during future injection in the Berlín geothermal field will not differ too greatly from the mass of quartz precipitating under the present injection temperature. A maximum difference of 15% in the percentage of clogged pores is expected. However, for a damaged zone of 10 m, the simulations show that after 10 years a great proportion of the well will be clogged in all the scenarios modeled and that the well probably will not be very useful (43 to 50% decrease in porosity). Experimental results of silica polymerization and deposition and radiotracer tests allow the calculation of polymerization and precipitation times and groundwater velocities. The information is used to calculate the area around the wells likely to be affected by silica scaling. Using the fastest velocity found in the tracer tests, a maximum radius of 72 m away from the well is found. However, only a very small fraction of the water reaches the highest velocity. More representative of the damaged zone is the radius calculated with the mean velocities for water movement between wells. Considering the fastest mean velocity, a radius of 9 m is found. The damaged zone could have an area ranging from a few centimeters up to 9 m. Comparison of these results with geochemical modeling shows that for Berlín geothermal field, an area for silica scaling around the wells of 10 m could produce 4-5% pore reduction per year or about 30% in 6 years. If the radius is smaller, the well will clog in a shorter time, as probably happened in well TR-1A in 1999. The results show that field experiments and geochemical modeling can help to predict and assess silica scaling in geothermal injection wells, and set the basis for complete groundwater flow, solute transport, and reaction

modeling. As the clogging of pores seems to happen close to the wells, hydraulic effects are proposed to explain the abrupt response of nearby wells (for example well TR-14) when injection starts in a new well.

Keywords: Berlín, El Salvador, geochemistry, silica, radiotracers, modeling.

1. Introducción

En El Salvador, Centroamérica, la energía geotérmica es uno de los pocos recursos energéticos nacionales disponibles para la generación de electricidad, alcanzando el 21% del total generada en el país. Esto coloca al país como el que satisface la mayor proporción de su demanda de energía eléctrica a partir de sus recursos geotérmicos. Uno de los dos campos geotérmicos más importantes en El Salvador es el de Berlín (Figura 1) que empezó su operación en 1992 con una unidad turbogeneradora a contrapresión de 5 MW. En 1995 se incorporó otra similar y en 1999 estas dos unidades se reemplazaron por dos unidades turbogeneradoras a condensación de 28.12 MW cada una, las cuales están en operación a la fecha. Por lo tanto, el campo tiene actualmente una capacidad instalada de 56.24 MW.

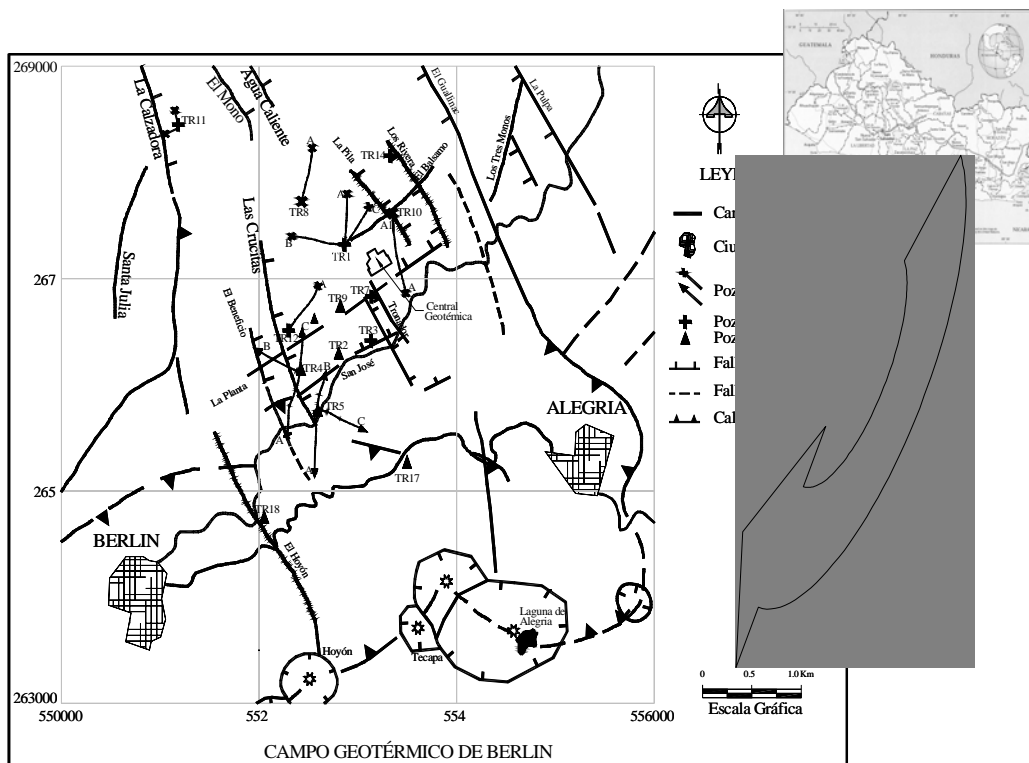


Fig. 1. Campo Geotérmico de Berlín y escenario tectónico del área de estudio. Adaptada de CEL (1999).

Una característica muy importante en la operación del campo de Berlín es que el 100% del agua residual generada (aproximadamente 350 kg/s) se inyecta nuevamente al reservorio. Uno de los problemas principales de la inyección es el alto contenido de sílice en las aguas geotérmicas residuales que pueden precipitar. Esta precipitación de sílice no ocurre dentro del sistema de acarreo superficial, pero sí dentro del reservorio debido a la dilatación de la inducción o tiempo de la polimerización de la sílice para la temperatura de inyección (175° C).

En 2004 se inició el proyecto Ciclo Binario en el campo, mediante el cual se aprovechará el calor residual contenido en el agua separada (de 180° C) para generar 9.2 MW de energía eléctrica adicional con un caudal

promedio de agua de 300 kg/s. Las aguas desechadas de este proceso tendrán más baja entalpía (140° C) y una sobresaturación de sílice más alta que las aguas reinyectadas actualmente y que se controlarán manteniendo con ácido sulfúrico el pH a 5.75 ya que los experimentos de polimerización y de deposición de sílice así lo sugieren (Molina *et al.*, 2005). Estos experimentos indican que la incrustación por sílice no ocurrirá dentro del sistema de acarreo, porque el tiempo de recorrido del agua residual desde la planta de ciclo binario a los pozos reinyectores no excederá el tiempo de polimerización de sílice. Sin embargo, sí habrá precipitación de sílice dentro del reservorio.

El proceso de incrustación por sílice en el reservorio puede entenderse con la simulación de la inyección bajo diferentes escenarios de operación del campo geotérmico y en condiciones actuales y futuras. Los programas usados para estas simulaciones son SOLVEQ (Reed y Spycher, 2001) y CHILLER (Reed y Spycher, 2000). Otros estudios que pueden aportar información adicional para entender el proceso de la incrustación por sílice son: pruebas de radiotrazadores (Matus, 2003; Matus *et al.*, 2000), los ensayos de polimerización y deposición de sílice (Molina *et al.*, 2005) y los estudios geoquímicos sobre incrustación de sílice (GENZL, 1995). Esta información, aunada a la simulación geoquímica, podría permitir estimar la vida útil de los pozos inyectoros, el mejor manejo de la inyección, el volumen afectado del reservorio, proponer "limpiezas" en los pozos y con ello extender la explotación del reservorio.

Así, el objeto de este trabajo es mostrar cómo la interpretación adecuada de los ensayos de campo y la simulación geoquímica pueden llevar a una mejor comprensión del sistema geotérmico en el campo de Berlín, y cuya experiencia metodológica puede extrapolarse a otros campos geotérmicos con diferentes escenarios geológicos.

Escenario geológico

El campo de Berlín se localiza al oriente de El Salvador, en la falda N-NO del volcán Tecapa. La cadena volcánica en esta región se relaciona a la subducción entre las placas de Cocos y del Caribe (Molnar y Sykes, 1969). Otro rasgo tectónico importante del área es el límite entre las placas del Caribe y Norteamericana cercana a Guatemala, ya que éste define el sistema de fallas Motagua-Polochic. Paralelamente a la costa del Pacífico centroamericano, desde Guatemala a Nicaragua, se ha formado un graben que cruza El Salvador del Oeste al Este (Molnar y Sykes, 1969). La cadena volcánica sigue el margen sur de este graben. La Figura 1 muestra la situación del Campo Geotérmico de Berlín en El Salvador y Centroamérica y las principales fallas del área.

Según D'Amore y Tenorio (1999) el flujo de los fluidos se inicia en el sur del campo entrando al área de explotación alrededor del pozo TR-5 (Figura 2) con circulación hacia el norte, liberando calor ya sea por conducción y/o ebullición. Las rocas encontradas en el área del campo geotérmico son principalmente flujos de lava andesítica intercalada con capas de toba silícica de espesor mayor hacia la parte central del campo (1883 a 1943 m) y menor cerca de la superficie (Figura 2). Los minerales de alteración son principalmente cuarzo, calcita, clorita y penninita, wairakita, epidota, illita, albita y óxidos férricos (CEL, 1999).

El campo presenta un típico sistema geotérmico de tipo hidrotermal compuesto por una fuente de calor capaz de calentar a los fluidos contenidos en las rocas, un reservorio donde se pueden almacenar esos fluidos calientes, una capa sello capaz de aislar el reservorio de la superficie y una zona de recarga. Así, esquemáticamente presenta una zona productora central (Zona B) con temperatura alta (entre 280 y 300° C) y permeabilidad buena, una área más fría al Noreste (Zona A de inyección) de temperaturas menores (entre 220 y 250° C) y permeabilidad más baja, y una zona Sur bajo exploración que es la posible expansión del campo (Zonas C, D) con temperaturas posibles de 255° C (Figura 3). La porosidad media del reservorio se ha

estimado entre 5 y 10%. Las dimensiones del reservorio son de alrededor de 6 x 7 x 0.3 km, para un volumen de 12.6 km³ que incluye la zona de producción y la de inyección (SIGET, 2000).

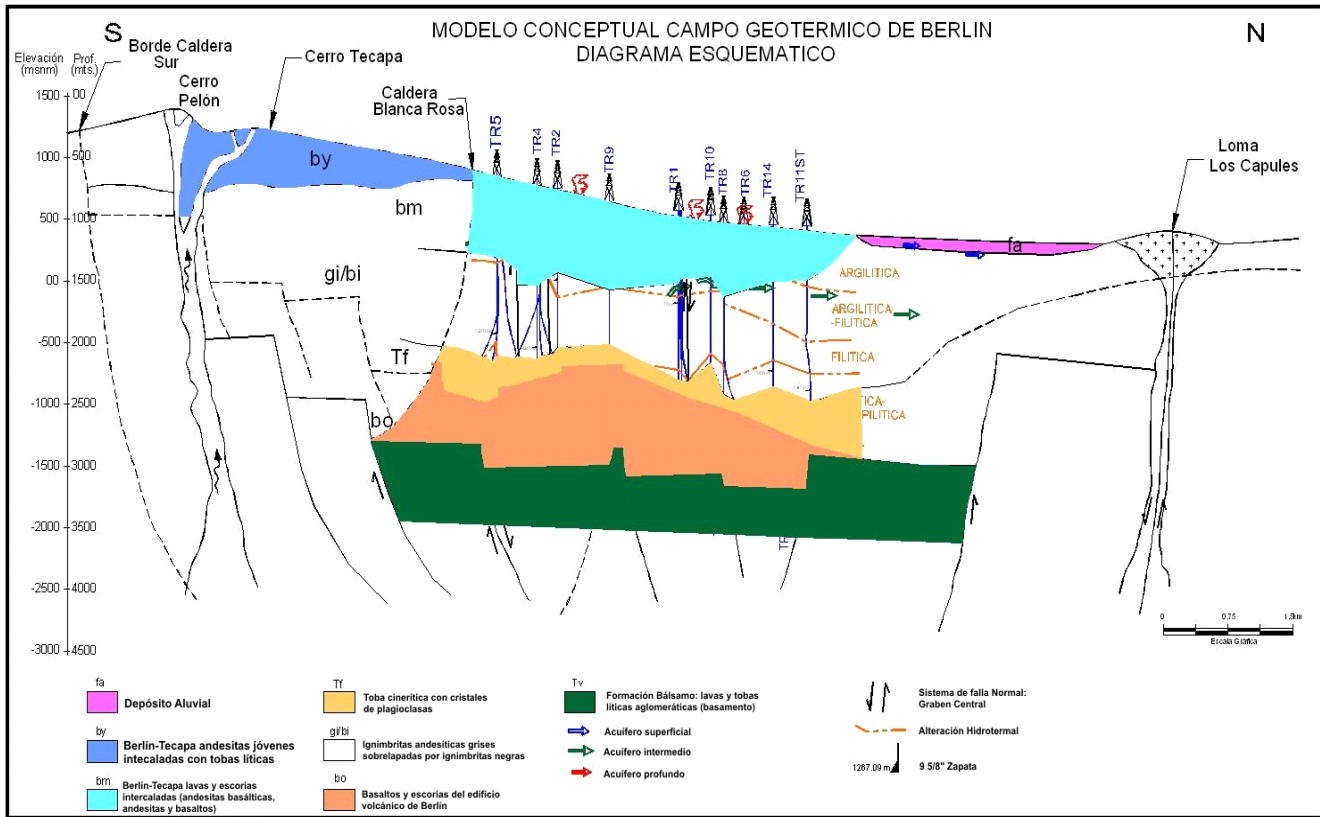


Fig. 2. Representación esquemática de la distribución litológica del Campo Geotérmico de Berlín. Adaptada de CEL (1999).

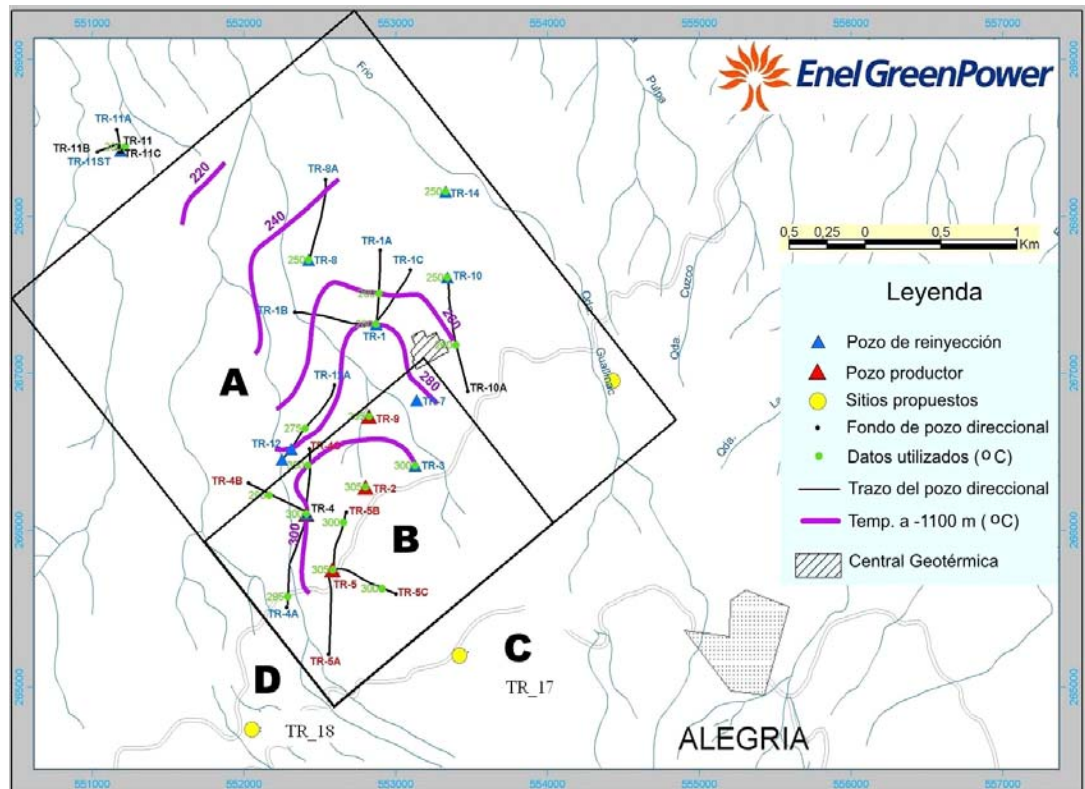


Fig. 3. Mapa de distribución de temperaturas del Campo Geotérmico de Berlín (LaGeo, 2004)

2. Ensayos de campo y proceso de simulación numérica

Comportamiento de pozos inyectoros y geoquímica

Inicialmente el suministro de vapor para las unidades turbogeneradoras a contrapresión provino de los pozos TR-2 y TR-9 y la inyección en caliente se dispuso en los pozos TR-8 y TR-14. Actualmente, el vapor adicional para la operación de las unidades turbogeneradoras a condensación se extrae de los pozos: TR-4, TR-4B, TR-4C, TR-5, TR-5A, TR-5B y TR-5C. La totalidad de aguas residuales en caliente se reinyectan en los pozos: TR-1A, TR-1B, TR-1C, TR-3, TR-4A, TR-8A, TR-10, TR-11ST, TR12 y TR-12A. Las aguas residuales frías (producto de las purgas de los sistemas de separación agua-vapor) se inyectan en los pozos TR-7 y TR-11A.

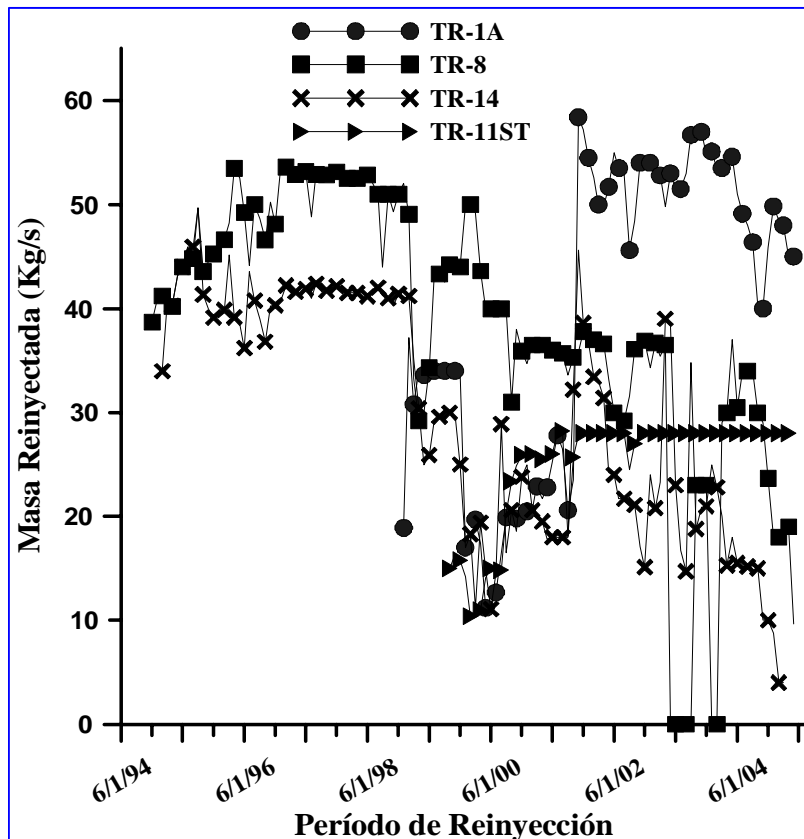


Fig. 4. Historial de la capacidad de inyección de agua geotérmica de algunos pozos reinyectores del Campo Geotérmico de Berlín

La Figura 4 muestra el historial de los pozos inyectoros TR-1A, TR-11ST, TR-8 y TR-14. Se observa que después del inicio del pozo TR-1A la capacidad de inyección de agua del pozo TR-14 disminuyó, desde un promedio de 42 kg/s hasta un promedio de 10 kg/s, durante un lapso de tiempo de 1.25 años. Nótese que el pozo TR-14 mostró una capacidad de inyección muy estable durante un periodo de cuatro años, antes de que entrara en operación el pozo TR-1A.

En la Figura 5 se grafica el comportamiento de los índices de saturación de sílice (escala natural) contra la temperatura, para el pozo TR-11ST. Este comportamiento sugiere que la sílice no precipita a las condiciones de cabezal ni dentro de la tubería del pozo, pero sí probablemente en zonas de inyección del reservorio. Así, es muy probable que la precipitación de sílice no sea la única causa de la disminución de capacidad de inyección de agua de los otros pozos inyectoros y que posiblemente también

intervengan interacciones hidráulicas.

Polimerización e incrustación de la sílice. Movimiento del agua en el reservorio

En Berlín, el agua separada está supersaturada de sílice, aunque su precipitación no ocurre inmediatamente. Varios autores han modelado los procesos de polimerización y precipitación de sílice en medios porosos (Malate y O'Sullivan, 1988; Mroczek *et al.*, 2000; entre otros). Sin embargo, el problema de polimerización y deposición de sílice en los medios fracturados es probablemente más complejo. El periodo de tiempo antes de que la sílice comience a polimerizarse se denomina tiempo de inducción y para una temperatura dada disminuye con la sobresaturación.

El problema de deposición de sílice dentro de los pozos inyectoros involucra varios pasos:

1. Durante el rápido enfriamiento en los sistemas de separación agua-vapor, la conducción por el sistema de acarreo superficial, el paso por el pozo inyector y finalmente en el reservorio, no hay precipitación porque el tiempo de inducción de la polimerización aún no ha terminado.

2. En el reservorio, el agua viaja una corta distancia antes de que la sílice empiece a precipitarse. La distancia recorrida depende de la velocidad del agua en el reservorio y del tiempo de la inducción, después de iniciado el viaje a lo largo del sistema de acarreo.

3. El fluido se mueve y la sílice precipita hasta que se alcanza la saturación con respecto a la solubilidad de la fase mineral correspondiente (cuarzo en el caso de Berlín). Se puede utilizar el tiempo necesario para precipitar y alcanzar la saturación, así como datos sobre la velocidad del agua dentro del reservorio, para estimar la distancia recorrida durante esta travesía. La distancia total o radio del reservorio afectado por la incrustación de la sílice estarán dados por la suma de la distancia encontrada en el numeral 2 más la distancia encontrada en el numeral 3.

4. La disminución en la porosidad respecto al tiempo para el área afectada puede encontrarse si se conoce la masa y el volumen de sílice precipitada por unidad de masa de fluido reinyectado.

Estudios de radiotrazadores

Nueve pruebas de radiotrazadores se han llevado a cabo en el campo de Berlín, con éxito variable. De estas pruebas se puede obtener el tiempo de viaje de los fluidos entre varios pozos (Matus, 2003; Matus *et al.*, 2000). La primera de las pruebas se llevó a cabo en mayo de 2000 con la inyección de I-131 (1.96 Ci) en el pozo TR-12A. Un ejemplo de la recuperación o curvas de detección se presenta en Figura 6, en la cual pueden obtenerse los diferentes tiempos de llegada (por ejemplo: más rápidos, finales y concentración máxima del trazador). En la otra prueba realizada en marzo de 2003 se inyectó I-125 (0.9296 Ci) en el pozo TR-4A (Matus, 2003). El trazador se recuperó sólo en el pozo TR-5A. La Tabla 1 muestra los diferentes tiempos de llegada de esta prueba y también los resultados para otros pozos.

Las distancias horizontales entre los diferentes pozos involucrados en las pruebas de trazadores exitosas, así como los tiempos de llegada de los radiotrazadores pueden usarse para calcular la velocidad máxima, mínima y promedio del agua en el reservorio (Tabla 1). Nótese que la velocidad media para la pareja de pozos TR-12A - TR-4C es igual a 2.2 m/min o $6.1E^{-4}$ m/s, que está dentro del intervalo de valores reportados por Montalvo *et al.* (2000).

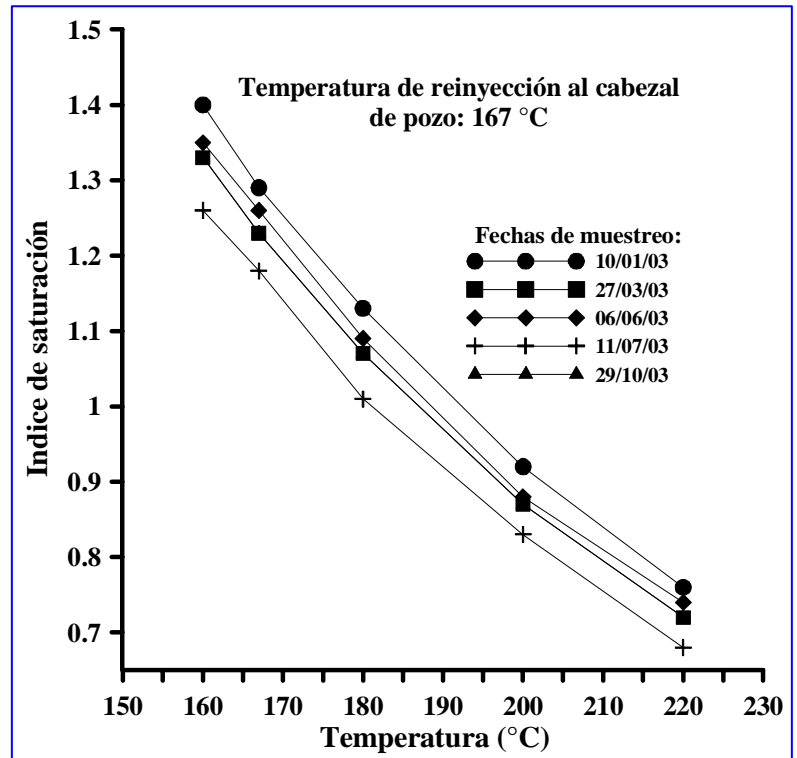


Fig. 5. Índices de saturación de la sílice amorfa del año 2003 para el pozo TR-11ST del campo geotérmico de Berlín (Castro *et al.*, 2005).

Pozos	D (m)	Ti (días)	Tf (días)	Tmax (días)	Velocidad máxima (m/h)	Velocidad mínima (m/h)	Velocidad media (m/h)
TR12A-TR9	306.0	11	85	29	1.2	0.2	0.4
TR12A-TR4C	419.5	1	88	8	17.5	0.2	2.2
TR12A-TR5A	1710.5	15	92	82	4.8	0.8	0.9
TR12A-TR5B	800.6	3	93	28	11.1	0.4	1.2
TR4A-TR5A	404.9	7	58	24	2.4	0.3	0.7

D = Distancia, Ti = Primer tiempo de llegada, Tf = Tiempo final de llegada, Tmax = tiempo de llegada para la máxima concentración (Matus *et al.*, 2000 y Matus, 2003).

Tabla 1. Resultados de las pruebas de radiotrazadores para los pozos del Campo Geotérmico de Berlín.

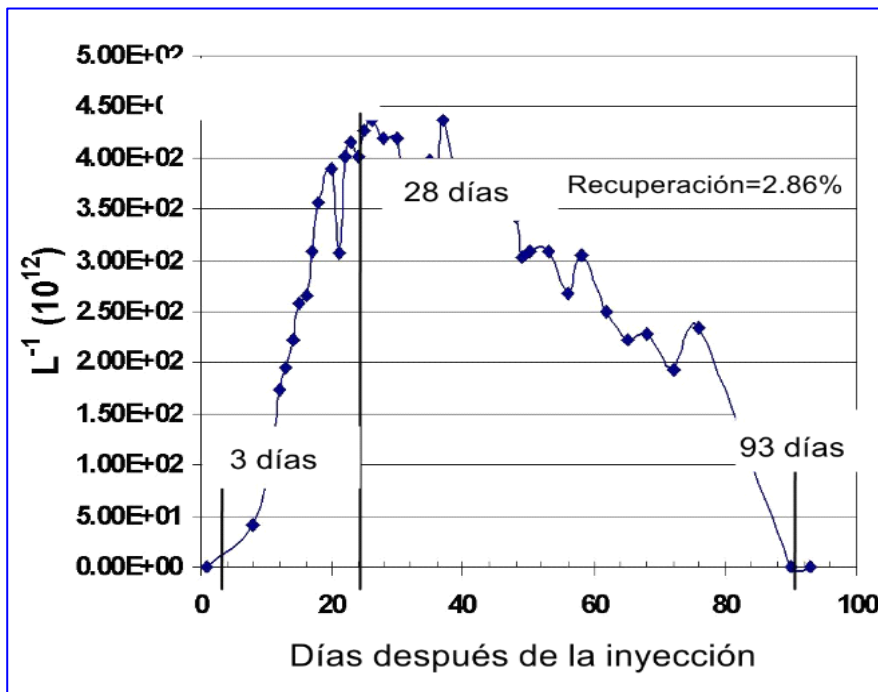


Fig. 6. Curva del avance de la prueba de radiotrazadores en el pozo TR-5B. El radiotrazador fue inyectado en el pozo TR-12A el 16 de mayo de 2000 (Matus *et al.*, 2000).

Experimentos de polimerización y deposición de la sílice

Se realizaron algunos experimentos de polimerización y deposición en el campo geotérmico de Berlín (Molina *et al.*, 2005; SKM, 2004). En estos experimentos el agua caliente separada de los pozos TR-4 y TR-5 se envió a unos intercambiadores de calor para simular el paso del fluido por una planta de generación a ciclo binario. Posteriormente, el agua geotérmica enfriada se introdujo a un tanque de polimerización que simuló el tiempo de residencia del fluido en el sistema de acarreo superficial y en las tuberías del pozo. El tiempo de residencia se estimó en 60 minutos para una velocidad de flujo de 3 m/s. Se tomaron varios “puntos de muestreo” para considerar diferentes

tiempos de residencia y realizar el análisis de sílice monomérica y total.

Después del paso por el tanque de polimerización, el fluido viajó a lo largo de un sistema de deposición de sílice (sistema de tubería tipo serpentín), el cual fue pesado para evaluar la masa de sílice precipitada en cada prueba. Se utilizó agua sin y con tratamiento químico y enfriada a diferentes temperaturas. El tratamiento con ácido clorhídrico, para reducir el pH y retardar el tiempo de inicio de la polimerización, se hizo antes de entrar a los intercambiadores de calor.

Los resultados muestran que el tiempo de polimerización depende de la temperatura y del tratamiento o control del pH (Figura 7). Por ejemplo, para el agua no tratada, al enfriarse por el intercambiador de calor a una temperatura alrededor de $165^{\circ}C$, el tiempo de polimerización es 120 minutos. Si esta misma agua es enfriada alrededor de los $100^{\circ}C$, la polimerización es instantánea (tiempo cero). Estos resultados son consistentes con el trabajo de Rothbaum y Rohde (1979) pudiendo predecirse el tiempo de polimerización más alto a la temperatura más alta. La temperatura del agua de inyección varía entre $185^{\circ}C$ y $175^{\circ}C$ en su

recorrido desde los sistemas de separación a los pozos, lo que da un promedio de 180° C. Así, extrapolando para el agua no tratada a 180° C en la Figura 7, se estima un tiempo de polimerización de 167 minutos.

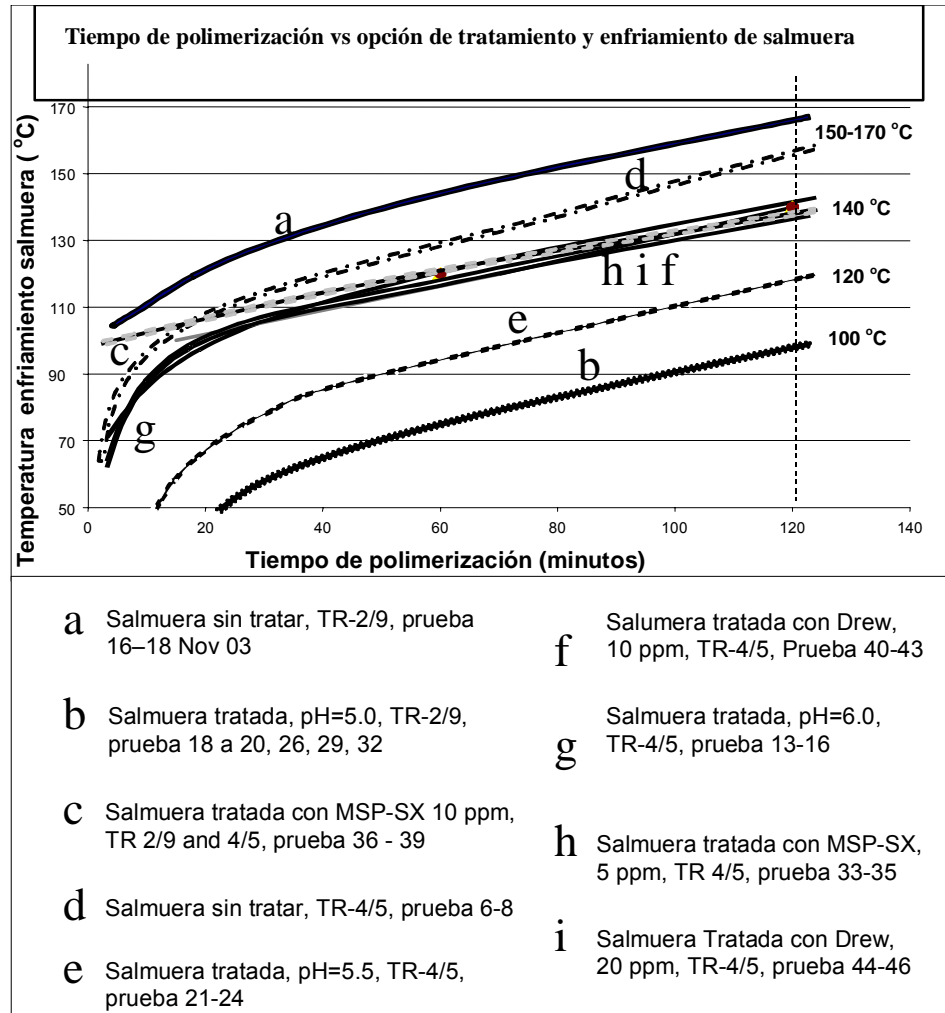


Fig. 7. Temperatura de agua geotérmica versus tiempo de polimerización para las pruebas de polimerización y deposición de sílice en el campo geotérmico de Berlín (Molina et al., 2005).

SKM (2004) estima para diferentes tiempos de polimerización y deposición el tiempo necesario para reducir el índice de saturación de sílice a 1. Este es el tiempo necesario para que precipite la sílice y alcance el equilibrio a la temperatura que se encuentra el agua. El tiempo de precipitación se estima aproximadamente en 66 minutos para una temperatura de 100° C, aproximadamente 79 minutos para 120° C y 108 minutos para 140° C. Para las temperaturas más altas los gráficos no se completan porque el tiempo de precipitación más grande que se necesitaba fue de dos horas. Una extrapolación adecuada de estos tres valores permite inferir un tiempo de 163 minutos para una temperatura de inyección de 175° C.

Simulación de la precipitación por sílice (proceso de modelado)

La Figura 8 muestra un modelo conceptual en el que se representa el movimiento radial que tiene el agua geotérmica reinyectada al reservorio y los posibles radios a los cuales la sílice podría estar precipitando. Los procesos físico-químicos que fueron simulados en este trabajo se presentan a continuación:

1. Reconstitución del agua del reservorio y agua de inyección. Se utilizó el programa SOLVEQ para calcular la composición del agua original a condiciones de reservorio a partir de las composiciones de agua y gases tomadas a condiciones de cabezal del pozo TR-9 (fecha 16/02/05), con una fracción de vapor en la descarga de 0.2504. La composición del agua del reservorio se calculó para una condición de temperatura de 290° C y

una presión de 120 bars. De una manera similar, la composición del agua de inyección se reconstituyó a 175° C a partir de las condiciones de muestreo en el cabezal del pozo TR-1A (fecha 08/02/05). En este caso, la fase gaseosa no está presente.

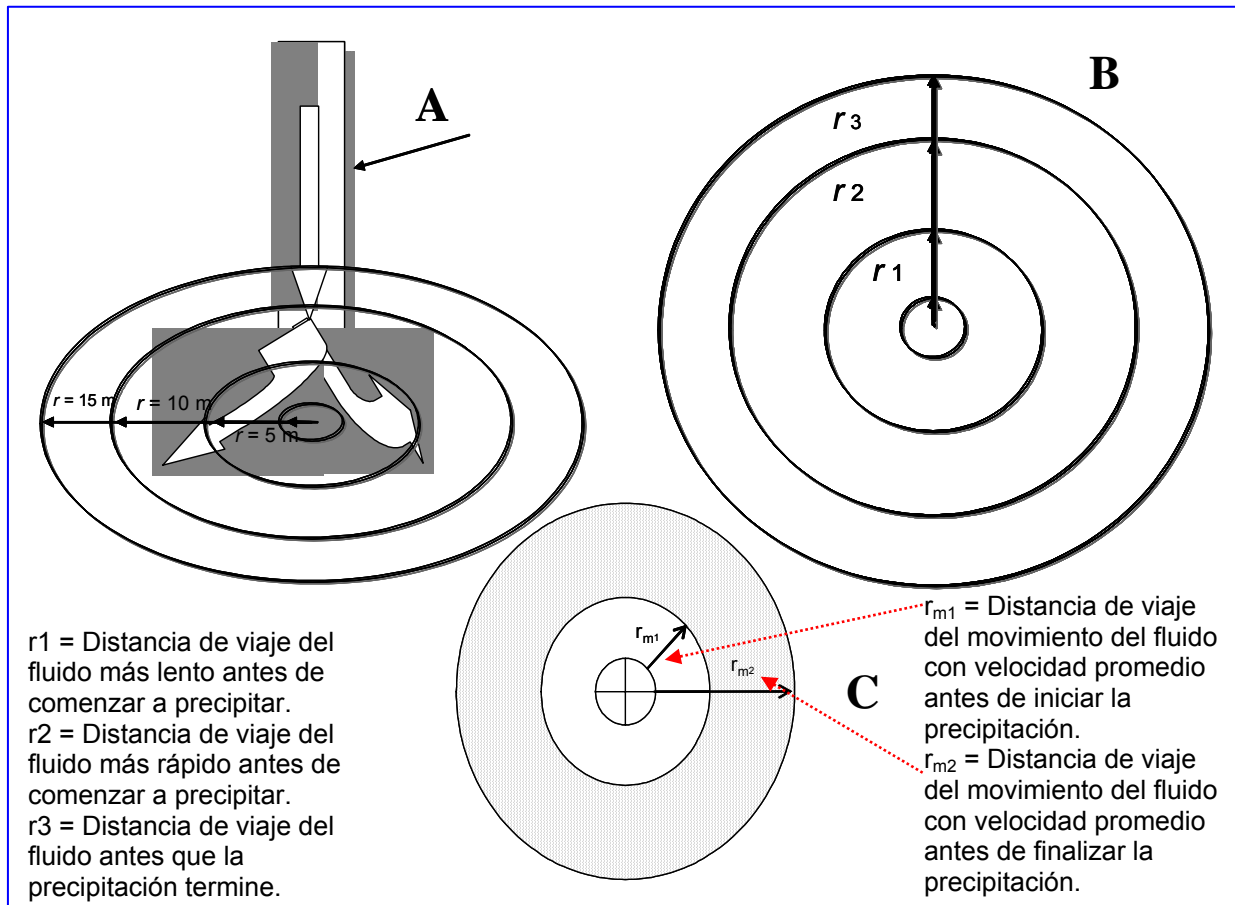


Fig. 8. Movimiento del agua geotérmica reinyectada al reservorio

A) Representación esquemática del radio de influencia de la incrustación de la sílice en un pozo inyector, **B)** Movimiento del agua con un intervalo de velocidades mínimas y máximas y **C)** Movimiento del agua a una velocidad promedio

2. Enfriamiento del agua en el reservorio. El agua reconstituida del reservorio en la zona de producción del pozo TR-9 fue enfriada de 290° C a 150° C en pasos de 10° C. Estas simulaciones se hicieron con y sin interacción entre el agua y los minerales de la roca. En ambos casos con fraccionamiento (o separación) de minerales después de asumir que cada paso de temperatura había pasado. Así, se usaron las opciones del CHILLER de intercambio de temperatura, interacción agua-roca y equilibrio de minerales.

3. Mezcla de aguas e incrustación de sílice. El agua de inyección reconstituida a una temperatura de 175° C (TR-1A) se mezcló con el agua reconstituida del reservorio (pozo TR-9). Esta mezcla se realizó adicionando diferentes proporciones de agua de reservorio a 1 kg de agua de inyección hasta un 10% de agua de inyección y usando la opción del CHILLER "Water Mix". Se utilizó la composición del agua de reservorio a las temperaturas de 250° C y 200° C porque los pozos inyectoros están dentro de este intervalo de temperaturas. En estas simulaciones se consideró la opción con y sin interacción entre el agua y los minerales de la roca. En ambos casos con fraccionamiento (o separación) de minerales después de asumir que cada paso de temperatura había concluido.

Para simular las condiciones futuras de inyección se enfrió el agua del pozo TR-1A hasta una temperatura de 140° C y un pH de 5.75 (se agregó H₂SO₄ para reducir el pH desde 6.5). En este caso también se simuló la mezcla con aguas reconstituidas del reservorio repitiendo el mismo procedimiento en cuanto a proporciones y temperaturas de mezcla de la simulación anterior (para el agua a 175° C). En estas simulaciones sólo se consideró la interacción agua-roca, además del fraccionamiento de minerales. Para las simulaciones con interacción agua-roca se usó el arreglo mineral observado en la zona de producción del campo y que se incluye en la base de datos termodinámicos del CHILLER (albita, anhidrita, calcita, clinocloro, galena, hematita).

3. Resultados y discusión

Simulación numérica de la incrustación por sílice (enfriamiento del agua de reservorio y mezclas de aguas)

La Figura 9 muestra los resultados para el enfriamiento del agua de reservorio reconstituida a partir del pozo TR-9 con las condiciones mencionadas anteriormente (inciso 2 del apartado anterior). Al parecer no hay una diferencia significativa para el cuarzo precipitado en los casos con y sin interacción agua-roca. Nótese que la precipitación más alta de cuarzo ocurre durante el primer cambio de temperatura (290° C a 280° C) ya que el agua supersaturada de sílice se equilibra. Durante los pasos subsiguientes, el cuarzo precipita debido a la disminución de temperatura que produce una menor solubilidad de este mineral.

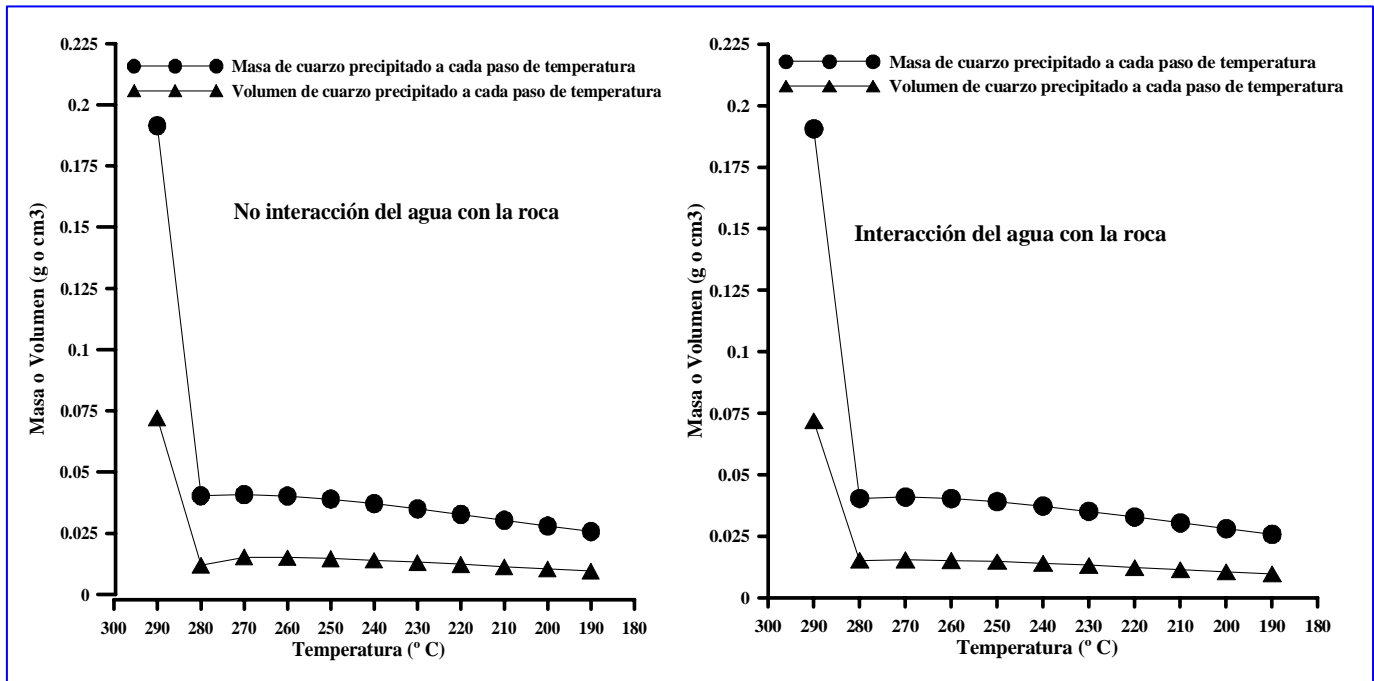


Fig. 9. Comportamiento de la sílice durante el enfriamiento del agua de reservorio de la zona del pozo TR-9. Izquierda: Sin interacción agua-roca, derecha: Con interacción agua-roca

La Figura 10 muestra los resultados de la simulación para la mezcla conforme a las condiciones mencionadas anteriormente. Los valores de la abscisa varían de 0.99 a 0.1 de fracción de masa de agua inyectada respecto a la del reservorio. Puede observarse en estos gráficos (10 C y 10 D) que la temperatura de la solución al final de cada paso es la misma para los casos sin y con interacción agua-mineral. Otros parámetros como la masa y volumen del cuarzo precipitado a cada paso, la concentración final de sílice en la solución y la masa de cuarzo precipitada por masa total de agua mezclada se comportan de manera semejante, mientras que sus

valores son también muy similares en ambas ejecuciones. La precipitación más alta de cuarzo ocurre rápidamente al primer paso de mezcla, cuando el agua inyectada se equilibra térmicamente y se mezcla con 0.01 kg de agua del reservorio; después, sólo cantidades pequeñas de cuarzo precipitan.

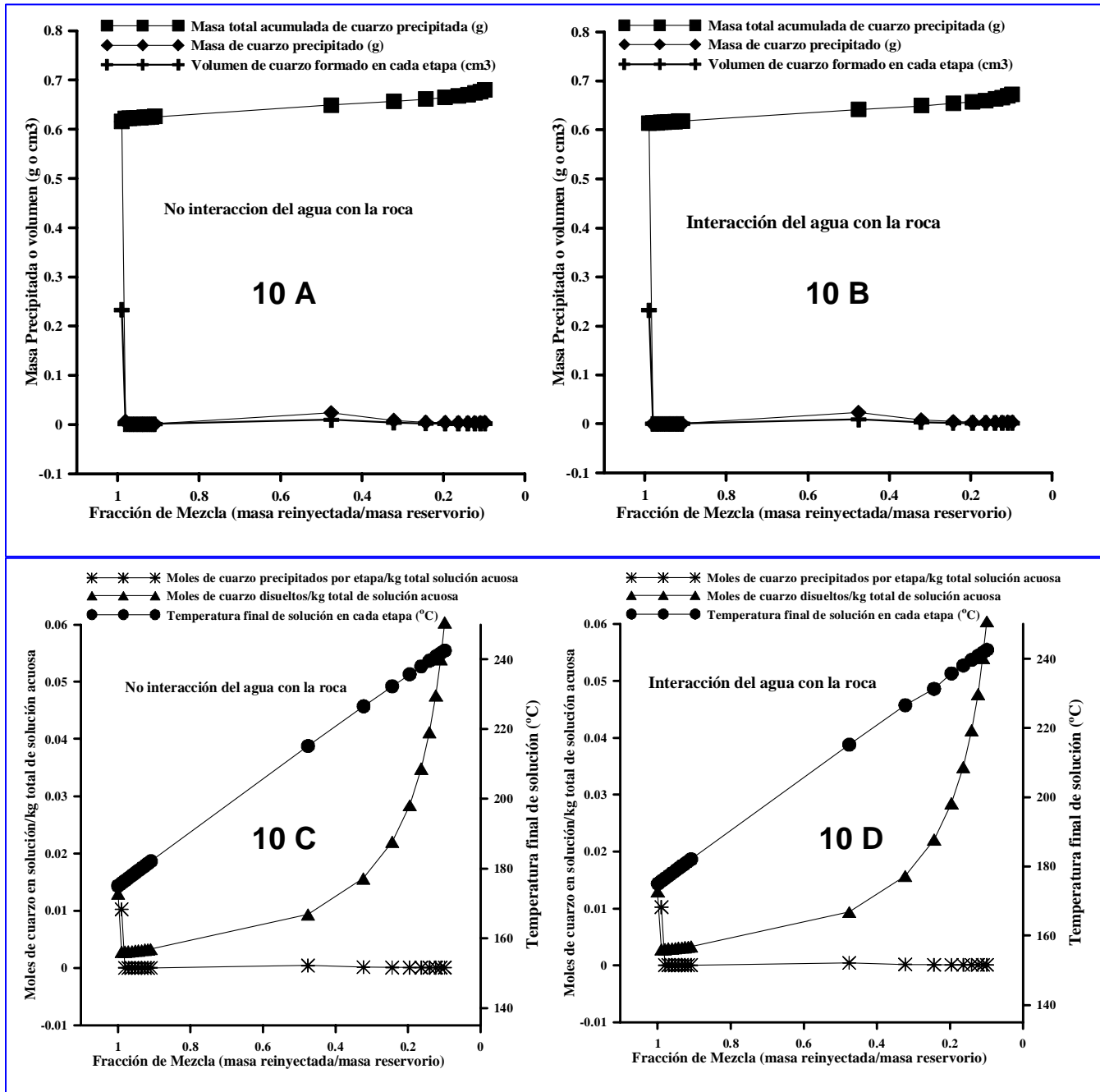


Fig. 10. Comportamiento de la sílice en la mezcla de aguas de inyección a 175° C con agua de reservorio a 250° C, asumiendo fraccionamiento de minerales. 10 A y 10 C: No interacción agua-roca, 10 B y 10 D): Interacción agua-roca.

Un resultado importante de estas simulaciones es que la masa total de cuarzo precipitada es casi constante y sólo depende de la concentración inicial y de la masa de agua inyectada. La masa total de cuarzo precipitada a partir de 1 kg de agua inyectada, es de 0.672 g sin interacción agua-roca y de 0.679 g con interacción agua-roca. Las simulaciones utilizando el agua del reservorio enfriada a 200° C son similares a las mostradas con 250° C.

En esos dos escenarios de mezcla, la razón de la precipitación inicial de cuarzo corresponde al reequilibrio de la sílice en el agua inyectada, la cual se encuentra supersaturada a la temperatura de inyección. La adición subsiguiente de agua de reservorio y el incremento en la temperatura únicamente genera precipitación debido al reequilibrio del agua caliente del reservorio y el agua más fría inyectada en cada nueva fracción de mezcla y reequilibrio de temperatura. Estas simulaciones muestran que la masa de agua inyectada, su concentración de sílice y la temperatura de inyección determinan la masa de cuarzo que puede precipitar y puede taponar los poros de la formación. La temperatura del reservorio y su composición tienen sólo un efecto menor si se asume un equilibrio químico del cuarzo en el agua original del reservorio.

Estimación del radio de influencia de la sílice

Los resultados de las simulaciones realizadas dan una visión importante del proceso de precipitación de sílice y su impacto en la capacidad de inyección. La precipitación estimada varió de 0.612 g a 0.672 g en la mezcla a 200 y 250° C sin considerar la fracción mezclada. Esto corresponde a un volumen de entre 0.231 y 0.254 cm³. Si el caudal promedio reinyectado al pozo TR-1A es 38.8 kg/s durante 6.3 años (Romero, 2005), con un espesor de la zona de absorción de 200 m y un diámetro de 0.22 m, se puede calcular el volumen de reservorio afectado por la precipitación. Este correspondería a un volumen en la zona de absorción del pozo de 7.6 m³ (Mayorga *et al.*, 2001).

Los tratamientos químicos realizados a los pozos de Berlín para restaurar la permeabilidad, sugieren que un radio de 5 a 15 m es probablemente una buena suposición del área afectada (Schlumberger Surencó, com. pers., 2000). Esta estimación se basa en el cono de depresión formado con un flujo de 32 l/s y en la cantidad de químico usado en el tratamiento.

Con esta información se puede estimar el volumen del reservorio alrededor del pozo para diferentes radios y la masa o volumen de cuarzo precipitado por año, el porcentaje del volumen (asumiendo diferentes radios) tapado por año y después de seis años de inyección (Tabla 2).

Fracción agua inyectada / agua de reservorio	Radio de absorción (m)	Volumen de zona de absorción (m ³)	Volumen precipitado por kg de agua reinyectada (cm ³)	Volumen total precipitado (m ³ /año)	% volumen taponado por año	% volumen taponado en 6 años
Mezcla en reservorio a 250° C						
0.99	5	1563	0.231	283.1	18.1	108.6
0.99	10	6276	0.231	283.1	4.5	27.0
0.99	15	14130	0.231	283.1	2.0	12.0
0.10	5	1563	0.254	310.3	19.9	119.4
0.10	10	6276	0.254	310.3	4.9	29.4
0.10	15	14130	0.254	310.3	2.2	13.2
Mezcla en reservorio a 200° C						
0.99	5	1563	0.231	282.9	18.1	108.6
0.99	10	6276	0.231	282.9	4.5	27.0
0.99	15	14130	0.231	282.9	2.0	12.0
0.10	5	1563	0.234	286.8	18.4	110.4
0.10	10	6276	0.234	286.8	4.6	27.6
0.10	15	14130	0.234	286.8	2.0	12.0

Tabla 2. Efecto de precipitación del cuarzo en la porosidad del reservorio cercana al pozo para una inyección a 175° C

Así, un radio de 5 m parece improbable ya que después de seis años todos los poros deberían de estar completamente tapados y el agua no podría circular. Un radio entre 10 y 15 m parece ser probablemente el más adecuado, ya que la reducción en la porosidad por año podría estar entre 2% y 5%, que parece más consistente con la disminución en la capacidad de inyección observada en los pozos. Si se consideran distancias mayores a 15 m, resultaría una disminución relativamente pequeña siendo la capacidad de inyección prácticamente despreciable.

Esos resultados sugieren que la precipitación de sílice en los pozos ocurre en una región cercana. Si esto es verdad, la precipitación en un pozo no debe afectar la capacidad de inyección de agua en otro pozo, por la distancia entre ellos (cientos de metros), o cuando menos su impacto no debería observarse en un periodo corto en pozos cercanos. Con base en esta premisa se puede afirmar que la respuesta del pozo TR-14 a la inyección en el TR-1A no se debe a procesos de incrustación por sílice, por lo que deben investigarse los cambios en el régimen hidráulico del reservorio por el volumen adicional de agua reinyectado.

Simulación de condiciones futuras de inyección

Los resultados entre las simulaciones para las condiciones actuales y las futuras de inyección son cualitativamente similares. Al igual que las condiciones actuales, la precipitación más alta de cuarzo ocurre al primer paso, cuando el agua inyectada se reequilibra térmicamente y se mezcla con 0.01 kg de agua del reservorio. Después de esto, sólo cantidades muy pequeñas de cuarzo precipitan debido al enfriamiento del agua del reservorio que se está mezclando con el agua reinyectada.

Un resultado importante de estas simulaciones, ya mencionado anteriormente, es que la masa total de cuarzo precipitada sólo depende de la concentración inicial de sílice y la masa en el agua inyectada. La masa total de cuarzo formada durante el primer paso de mezcla es de 0.678 g y de 0.677 g para ambos casos. Luego de ese paso y con la subsiguiente adición de agua de reservorio, la masa total de cuarzo precipitada a partir de 1 kg de agua inyectada es de 0.788 g para 250° C y de 0.708 g para 200° C. Al igual que en los escenarios actuales, la razón es que la precipitación inicial corresponde al reequilibrio del agua reinyectada supersaturada de sílice, la cual precipita como cuarzo para lograr el reequilibrio a la temperatura de inyección.

Comparación de los escenarios actuales y futuros de inyección

Bajo las condiciones de mezcla a 250° C, la masa total de cuarzo precipitado se incrementa de 0.672 g (cuando la inyección se realiza a 175° C) a 0.788 g (cuando la inyección se efectúa a 140° C y a un pH de 5.75). El volumen total de cuarzo formado aumenta de 0.254 cm³ a 0.297 cm³. Esto equivale a un incremento del 14.7% en la masa precipitada. Para las condiciones de mezcla a 200° C hay un incremento del 12.3% de cuarzo entre las condiciones actuales y futuras.

Estos resultados indican que las condiciones futuras de operación tendrán un aumento promedio de incrustación por sílice entre el 15% y 12%. Considerando la misma información utilizada para las condiciones actuales del pozo TR-1A, se puede estimar el porcentaje de volumen de poros del reservorio afectado por año en el proceso de incrustación por sílice (Tabla 3).

El decremento en la capacidad de aceptación de la porción del reservorio donde se inyecta para un periodo de 15 años, considerando los escenarios de mezcla a 250 y 200° C, se muestra en las Figuras 11A y 11B. En la Figura 11A, para una fracción de agua de inyección del 99%, el porcentaje de poros taponados en un periodo de 10 años se incrementa desde 43%, si la temperatura de inyección es de 175° C, hasta 48% si la temperatura de inyección es de 140° C. Para las mismas condiciones, si la fracción de agua de inyección es 10%, el porcentaje de poros taponados cambia de 47% a 55%. De una manera similar, en Figura 11B para

una temperatura de reservorio de 200° C, 10 años de inyección y un porcentaje del 99% de agua de inyección, el cambio en el porcentaje de poros taponados es de 43% a 175° C y de 48% a 140° C, y considerando de manera semejante el 10% de agua de inyección, el cambio es de 44% a 50%, respectivamente.

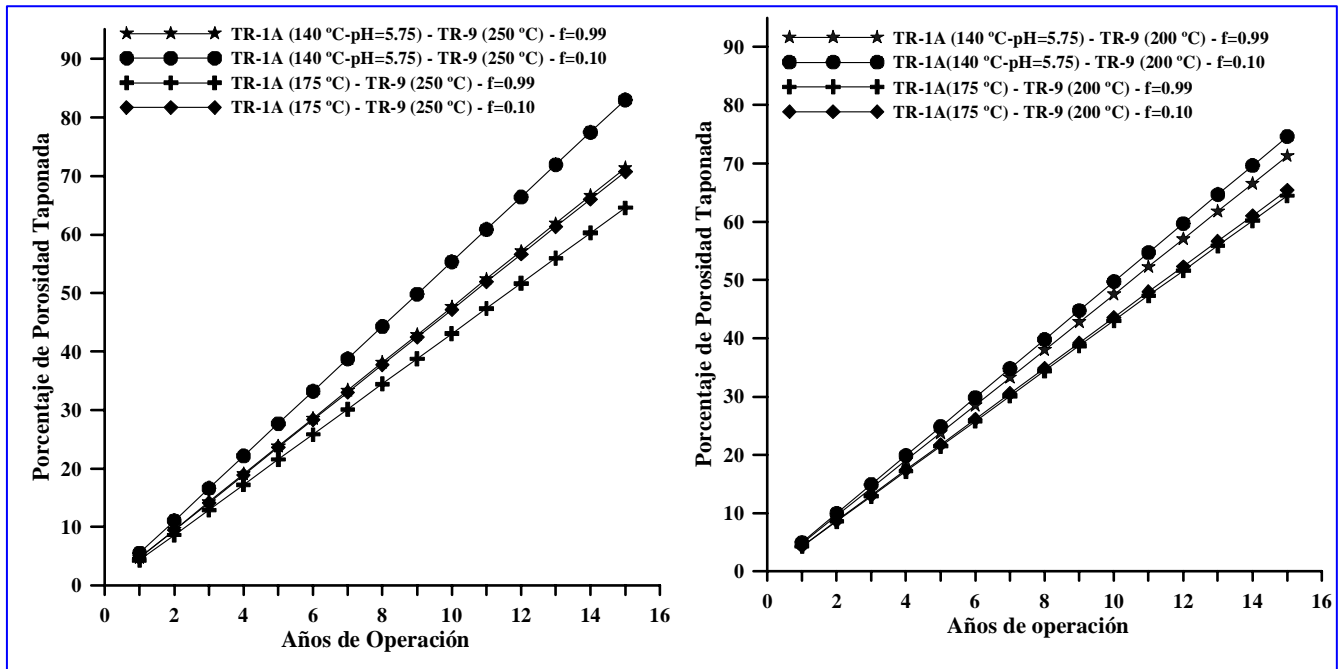


Fig. 11. Porcentaje de porosidad obstruida debido al volumen de cuarzo precipitado en la mezcla de aguas reconstituida a inyección en condiciones actuales (175° C) y condiciones de inyección futura (140 °C y pH = 5.75) con agua de reservorio para un radio fuera de pozo de 10 m, con interacción agua-roca y fraccionamiento de minerales. Figura izquierda: Temperatura de reservorio de 250° C. Figura derecha: Temperatura de reservorio de 200° C.

Temperatura de mezcla de agua (° C)	Fracción agua inyectada / agua de reservorio	Radio de zona de absorción (m)	Volumen precipitado por kg de agua inyectada (cm ³) con inyección a 140° C y pH = 5.75	Volumen total precipitado (m ³ /año) con inyección a 140° C y pH = 5.75	% volumen taponado por año con inyección a 140° C y pH = 5.75	% volumen taponado por año con inyección a 175° C
250	0.99	5	0.256	298.6	19.1	18.1
		10	0.256	298.6	4.8	4.5
		15	0.256	298.6	2.1	2.0
	0.10	5	0.297	347.1	22.2	19.9
		10	0.297	347.1	5.5	4.9
		15	0.297	347.1	2.5	2.2
200	0.99	5	0.256	298.2	19.1	18.1
		10	0.256	298.2	4.8	4.5
		15	0.256	298.2	2.1	2.0
	0.10	5	0.267	312.1	20.0	18.4
		10	0.267	312.1	5.0	4.6
		15	0.267	312.1	2.2	2.0

Tabla 3. Efecto de precipitación del cuarzo en la porosidad del reservorio cercano al pozo y comparación entre la inyección de agua a 14 ° C (con pH = 5.75) y 175° C

Estimación del radio de influencia de la sílice a partir de las pruebas de radiotrazadores

La distancia desde la zona de producción a los pozos TR-1A y TR-14 es de 3,200 m y 4,200 m, respectivamente, y para estas distancias se calculó el tiempo de viaje total del agua inyectada, obteniéndose un tiempo de viaje de 70 y 92 minutos, lo que da un promedio de 81 minutos. Este tiempo puede sustraerse de la polimerización o tiempo de la inducción para el agua a inyección (167 minutos, como se discutió antes) dando un tiempo de viaje dentro del reservorio de 86 minutos antes de que la sílice precipite.

Se usaron los datos de la Tabla 1 para calcular la distancia que viaja el agua dentro del reservorio durante el tiempo de la inducción y del proceso de precipitación de sílice. Se presentan dos escenarios. En el primero, se toma la velocidad máxima y mínima a la que viaja el agua (Figura 8B). El agua con velocidad mínima viaja una distancia r_1 antes de que la sílice empiece a precipitar, el agua con velocidad máxima viaja una distancia r_2 antes de que la precipitación empiece, y continúa hasta una distancia r_3 . La distancia entre r_2 y r_3 corresponde al tiempo de precipitación de la sílice del agua con velocidad máxima. Debe notarse que sólo un fragmento muy pequeño del agua está precipitando sílice cuando alcanza la distancia r_2 . Esto significa que r_1 y r_3 dan los límites de los radios para el proceso de precipitación. En la Tabla 1, la velocidad mínima es 0.2 m/h y la máxima de 17.5 m/h. Con estos valores, r_1 es igual a 0.3 m, r_2 sería igual a 25 m, y r_3 es igual a 72 m. Para estos cálculos se usó un tiempo de precipitación de 163 minutos.

El segundo escenario considera sólo las velocidades medias (la mayoría del fluido debe estar moviéndose con esa velocidad). En este caso (Figura 8C), el rm_1 representa la distancia recorrida por el agua en el reservorio antes de empezar a precipitar y $rm_2 - rm_1$ es la distancia que viajó durante el proceso de precipitación. Nótese que los diferentes caminos a los pozos en la Tabla 1 tienen diferentes velocidades medias. Si se toma una velocidad mínima promedio de 0.4 m/h, el rm_1 tiene un valor de 0.6 m y el rm_2 un valor de 1.7 m. Para una velocidad promedio máxima de 2.2 m/h, el rm_1 es igual a 3.1 m y el rm_2 es igual a 9.0 m.

En el primer escenario, las pocas moléculas que viajan a las velocidades más rápidas no es probable que precipiten a distancias mayores a los 72 m. Sin embargo, el segundo escenario probablemente representa mejor la conducta promedio de los procesos de incrustación. Según el segundo escenario, el área más afectada por la incrustación de sílice empieza a menos de 1 m del pozo pero no se extiende más allá de 9 m. En la sección de modelado quedó demostrado que la disminución de la aceptación de agua observada en los pozos de inyección después de unos años, así como la disminución de la permeabilidad y porosidad, sólo puede explicarse si la precipitación de sílice ocurre a distancias menores de 10 a 15 m (Tablas 2 y 3). Por otra parte, si el área afectada tiene un radio mayor, la reducción en la porosidad debe ser baja y los pozos deben continuar aceptando agua. Estos resultados son consistentes con los resultados de los modelados químicos, como era de esperar.

Validación del modelado

Aunque aún no se tienen datos para validar los resultados de la modelación para el agua de inyección a 140° C, se puede extrapolar esta validación a partir de la conducta histórica de la inyección a 175° C. Para esto se utilizó el comportamiento de la masa inyectada en los pozos TR-8 y TR-14, durante un periodo de dos años, del 01/01/97 al 02/01/99. Este periodo se consideró apropiado para este estudio de modelado debido a que es un intervalo de tiempo caracterizado por una generación estable en el campo geotérmico.

En la Figura 12 se presenta la masa promedio inyectada por segundo y por mes para el intervalo de tiempo indicado así como los ajustes de las tendencias lineales para estos datos. La pendiente de las tendencias lineales proporciona la disminución de la masa inyectada por unidad de tiempo. Los valores de las dos pendientes para los pozos TR-8 y TR-14 son -0.103 y -0.0453 kg/s/mes, respectivamente. Considerando el

flujo inicial de inyección durante este intervalo para los dos pozos (53.3 kg/s para el TR-8 y 42.2 kg/s para el TR-14), la disminución de la tasa de inyección es de 2.32% y 1.3%, respectivamente. El primer valor cae en el intervalo del porcentaje estimado del volumen taponado por año para radios entre 10 y 15 m (valores entre 2.0 y 4.9%, Tabla 3). El segundo valor (1.3%) corresponde a un radio ligeramente más grande de 15 m.

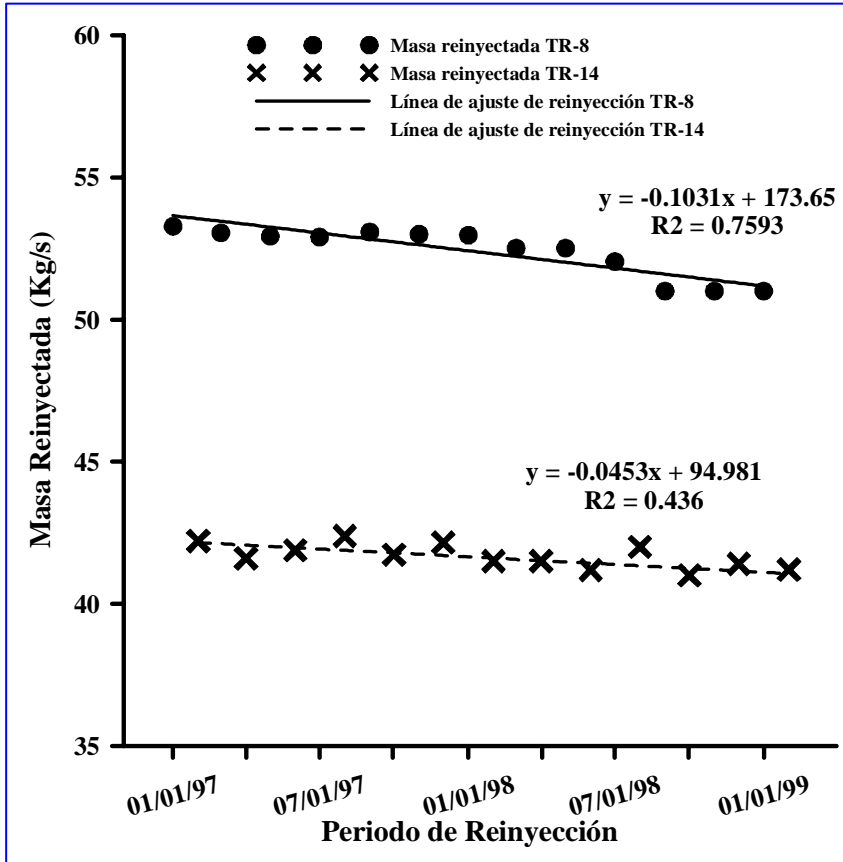


Fig. 12. Comportamiento de la capacidad de inyección de los pozos TR-8 y TR-14 en el periodo del 01/01/97 al 02/01/99

afectada podría tener un área con un radio que va desde unos centímetros hasta 9 m.

La comparación de esos resultados con el modelado geoquímico, muestra que para el campo geotérmico de Berlín un área de incrustación por sílice de 10 m alrededor de los pozos provocaría una reducción de porosidad de un 4% a un 5% por año, o de aproximadamente un 30% en seis años. Si fuese más pequeño, el pozo se taponaría en un tiempo más corto, como probablemente ocurrió en el pozo TR-1A en 1999.

Los resultados demuestran que los experimentos de campo y los modelados geoquímicos pueden ayudar a predecir o evaluar la incrustación por sílice en los pozos de inyección y establecen una base para un modelado completo de flujo de aguas subterráneas, transporte de solutos y reacciones químicas de paso. Como la obstrucción de los poros parece ocurrir en las proximidades de los pozos, las interacciones hidráulicas pueden explicar la declinación abrupta en la capacidad de inyección de los pozos, como el TR-14, cuando entran en operación pozos cercanos.

Este trabajo ha demostrado la importancia de integrar resultados experimentales (pruebas con radiotrazadores, pruebas de campo de precipitación de sílice, mediciones de caudales inyectados en pozos) con el modelado geoquímico, para obtener una comprensión más profunda de la incrustación de sílice en campos geotérmicos y para predecir su comportamiento en esquemas futuros de explotación.

4. Conclusiones

Los resultados experimentales de polimerización y depósito de sílice, así como las pruebas realizadas con radiotrazadores, permiten realizar el cálculo del tiempo de polimerización y precipitación, así como de la velocidad del agua inyectada al reservorio.

Esta información se utilizó para calcular el área o radio de influencia alrededor de los pozos que podría ser afectada por incrustación de sílice. Utilizando la mayor velocidad a la que se encontró que se mueve el agua de acuerdo con las pruebas de radiotrazadores, se obtuvo un radio de influencia máximo de 72 m. Sin embargo, sólo una porción muy pequeña del agua inyectada alcanza la velocidad más alta. Se calculó, por tanto, un radio más representativo, empleando la velocidad media del movimiento de agua entre los pozos, el cual resultó ser de 9 m. Así, la zona

Referencias

- Castro, M., D. López, J.A. Reyes, J. Ramírez H., O. Lázaro M. y F.E. Montalvo (2005). Simulación de la incrustación por sílice en la zona de reinyección del Campo Geotérmico de Berlín, El Salvador, C.A. *Memorias de la reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana*, Noviembre de 2005, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- CEL (1999). Informe Geológico Final del Pozo Direccional TR-1A. Informe interno de la División de Generación Geotérmica, Agosto de 1999, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C.A. Inédito.
- D'Amore, F., and J. Tenorio (1999). Chemical and physical reservoir parameters at initial conditions in Berlin geothermal field, El Salvador: A first assessment. *Geothermics*, v. 28, pp. 45-73.
- GENZL (1995). Prestación de servicios para desarrollar estudios geocientíficos complementarios en el Campo Geotérmicos Berlín. Contrato CEL-2301. Reporte interno. El Salvador, C.A. Inédito.
- LaGeo, S.A. de C.V (2004). Reporte de manejo del Campo Geotérmico de Berlín. Reporte interno. Julio de 2004. El Salvador C.A. Inédito.
- Malate, R.C.M., and M.J. O'Sullivan (1988). Mathematical modeling of silica deposition. *Proc. 10th New Zealand Geothermal Workshop*, p. 257-262.
- Matus, A. (2003). Radiotracer test in the well TR-4A Berlin Geothermal Field El Salvador. LaGeo S.A. de C.V., Internal Report, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador. Inédito.
- Matus, A., W. Guevara, y F. Montalvo (2000). Novena prueba de radiotrazador. Campo Geotérmico de Berlín. LaGeo S.A. de C.V., Reporte interno, Santa Tecla, El Salvador. Inédito.
- Mayorga, H., L. Barrios y M. Castro (2001). Programa de estimulación química TR-1A. GESAL, S.A. de C.V., Reporte interno, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C.A. Inédito.
- Molina Padilla, S.R., P. Barnett, M. Castro, E. Guerra, and J.L. Henríquez (2005). Silica polymerization and deposition trials at the Berlin Geothermal Field, El Salvador. *Proc. World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, April 2005.
- Molnar, P., and L.R. Sykes (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity. *Geol. Society of America Bulletin*, 80, pp. 1639-1684.
- Montalvo, F., A. Matus, and W. Guevara (2000). Ninth Radiotracer Test in Berlin Geothermal Field. Geotérmica Salvadoreña, S.A. de C.V., Internal Report, Santa Tecla, El Salvador. Inédito.
- Mroczek, E. K., S.P. White, and D.J. Graham (2000). Deposition of amorphous silica in porous packed beds-predicting the lifetime of reinjection aquifers. *Geothermics*, v. 29, pp. 737-757.
- Reed, M.H., and N.F. Spycher (2000). *User guide for CHILLER, a program for computing water and rock reaction, boiling, mixing and other reaction processes in aqueous and mineral and gas systems*. Department of Geological Sciences, University of Oregon.

- Reed, M.H., and N.F. Spycher (2001). *User guide SOLVEQ, a program for computing aqueous and mineral and gas equilibrium*. Department of Geological Sciences, University of Oregon.
- Romero, R. (2005) Historial del Campo Geotérmico de Berlín. LaGeo, S. A. de C. V., Reporte interno, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, C.A. Inédito.
- Rothbaum. H.P., and A.G. Rohde (1979). Kinetics of silica polymerization and deposition from dilute solutions between 5 and 180° C. *J. Colloid and Interface Sci.*, v. 71, No. 3, p. 533-559.
- SIGET (2000). Contrato de concesión para la explotación geotérmica de: Central Geotérmica de Ahuachapán y Berlín por la Sociedad Geotérmica Salvadoreña. Gerencia de Electricidad, Depto. de Normas Técnicas y Concesiones. Documento interno. Marzo de 2000, San Salvador, El Salvador, C.A.
- SKM (Sinclair Knight Mertz) (2004). Silica polymerization and deposition trials at TR4/5 and TR2/9 brine lines. In: Berlin Geothermal Field Binary Cycle Power Plant Project. Revision 3. Report presented to LaGeo S.A. de C.V. Internal Report, Santa Tecla, El Salvador. Inédito.