

Modelación química de aguas de formación del Activo Luna, Tabasco

Rosa M. Barragán R., Enrique Portugal M.,
Víctor M. Arellano G., Ana E. Martínez A.¹ y Fernando Ascencio C.²

Existen diversos procesos que ayudan a controlar y/o eliminar la formación de fases sólidas en las tuberías, su costo normalmente es alto y para llevarlos a cabo se requiere contar con la caracterización fisicoquímica del agua de formación.

Introducción

La formación de incrustaciones inorgánicas en tuberías profundas de pozos petroleros es un fenómeno que repercute en una disminución en la producción de los pozos y su ocurrencia depende de la composición química del agua de la formación, así como de la temperatura del yacimiento. Básicamente, la formación de fases sólidas se debe a la descompresión del fluido en su ascenso a la superficie, lo que modifica las condiciones de equilibrio fluido-mineral hacia fases termodinámicamente más estables (Ellis y Mahon, 1977).

En los yacimientos de petróleo la temperatura suele ser cercana al gradiente térmico promedio de la tierra, 25-30°C/km, (Elder, 1981). Considerando las profundidades a las que ocurre la explotación petrolera (5-6 km en el Activo Luna), la temperatura alcanza valores del orden de hasta 200°C; lo que denota la existencia de un gradiente local ligeramente mayor al promedio.

En el Activo de Producción Luna de Pemex se han presentado problemáticas por la ocurrencia de incrustaciones en tuberías profundas de pozos, ya que en la producción, se conjugan fenómenos tanto de descompresión como la relativamente alta temperatura de la formación. Existen diversos procesos que ayudan a controlar y/o eliminar la formación de fases sólidas en las tuberías, su costo normalmente es alto y para llevarlos a cabo se requiere contar con la caracterización fisicoquímica del agua de formación.

A partir de los datos de composición química del agua, puede modelarse el equilibrio químico a una temperatura dada para, posteriormente, obtener los índices de saturación de los minerales característicos con el objeto de conocer o predecir cuáles fases pueden formar los depósitos. La Geren-

cia de Productividad de Pozos (GPP) de la Subdirección de Tecnología y Desarrollo Profesional (STDP) de Pemex, tiene entre sus objetivos promover estudios tendientes a resolver problemáticas que impactan la productividad de los pozos, por lo que mostró interés en realizar un estudio de modelación química de las aguas de formación del Activo Luna, con el propósito de conocer el estado de saturación de las principales fases minerales. De esta forma, se realizó un proyecto conjunto entre la GPP, el Activo de Producción Luna de Pemex y la Gerencia de Geotermia del IIE, en 1997 (Barragán et al., 1998).

Los objetivos del proyecto fueron: (a) muestreo y caracterización fisicoquímica de aguas de pozos petroleros pertenecientes al Activo de Producción Luna, y (b) modelación del equilibrio químico a condiciones de cabezal y de yacimiento para obtener índices de saturación de minerales característicos de sistemas hidrotermales, con el propósito de predecir las fases minerales que pueden encontrarse en incrustaciones superficiales y profundas.

Muestreo y caracterización de fluidos

El muestreo se llevó a cabo, en noviembre de 1997, en el Activo Luna, localizado aproximadamente a 60 km al noreste de la Cd. de Villahermosa Tabasco (ver Figura 1). Se colectaron muestras de siete pozos, el agua se obtuvo usando embudos de separación y posteriormente se realizó el análisis químico de las muestras de agua. La composición química de las aguas se muestra en la Tabla 1. Como puede verse en la tabla, las aguas de formación contienen una elevada concentración de solutos, (hasta más de 200,000 mg/kg de Cl), siendo los iones dominantes el cloruro y el sodio. Por tal motivo, se clasificaron como de tipo clorurado sódico; además, tomando en cuenta la clasificación de Chevotarev (Dall'Aglio, 1992), las muestras resultaron ser aguas subterráneas de circulación restringida, lo que indica que se trata de aguas confinadas en uno o varios yacimientos. El agua del pozo Escuintle 2 presenta una salinidad más baja que el agua de los demás pozos. Los diagramas de Schoeller se emplean para identificar aguas de naturaleza similar o distinta

¹ Activo Luna, Pemex.

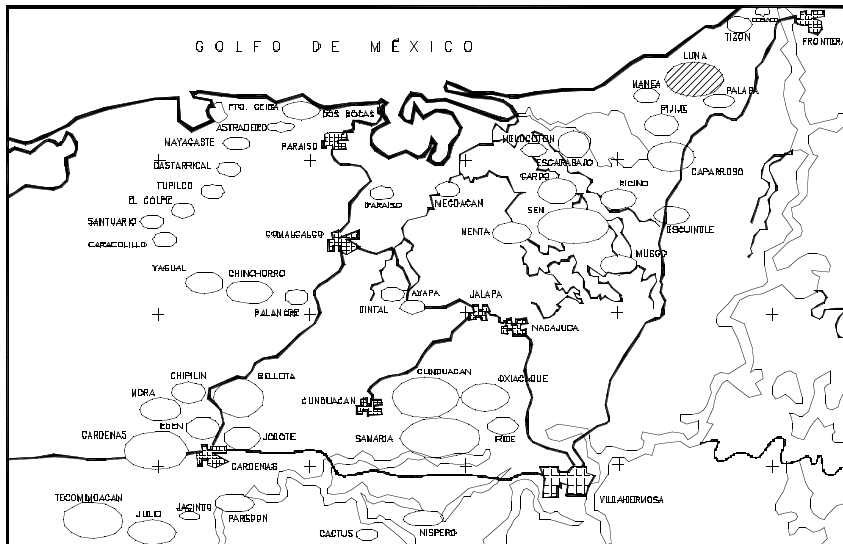
² Gerencia de Productividad de Pozos, STDP.

entre sí, de acuerdo con la forma de la curva que se obtiene al graficar su composición química (ver Figura 2). Como puede verse en el diagrama, con excepción de la muestra del pozo Escuintle 2, las demás muestras siguen el mismo patrón, lo que puede indicar que provienen de un mismo acuífero.

Se estimó la temperatura del yacimiento empleando el geotermómetro de composición catiónica (Nieva y Nieva, 1987). Este método utiliza la concentración de los principales cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++}) y dependiendo de su

composición relativa contiene cuatro diferentes expresiones para la estimación de temperatura del yacimiento. En los casos de aguas de yacimientos de alta temperatura la expresión a utilizar sólo es función de la relación Na/K. En el caso de las muestras de los pozos y de acuerdo con las proporciones de cationes se empleó la expresión característica de aguas de alta temperatura. Los resultados indican temperaturas de yacimiento de entre 162 y 236°C (ver Tabla 2).

Figura 1. Localización del Campo Luna.



Modelación de equilibrio químico

La mayoría de reacciones resultantes de la interacción agua-roca en yacimientos se equilibran rápidamente a temperaturas mayores de 150°C (Truesdell et al., 1987), esto hace válida la suposición de la existencia de equilibrio químico en las aguas del Activo Luna. El estado de equilibrio se expresa en términos de ecuaciones que gobiernan el comportamiento de las especies, las cuales son: (a) la ley de acción de masas; (b) balances de masa;

Tabla 1. Composición química de las muestras de pozos. (Concentraciones en ppm).

POZO	CAPARROSO 85 (CA-85)	CAPARROSO 195 (CA-195)	CAPARROSO 35 (CA-35)	CAPARROSO 81 (CA-81)	LUNA 3B (LU-3B)	LUNA 5 (LU-5)	LUNA 5 (LU-5)*	ESCUINTLE 2 (ES-2)
pH (22°C)	5.41	5.83	5.37	5.85	5.63	5.76	5.47	7.2
HCO ₃	87.7	106.1	36.6	98.6	102.4	89.6	86.2	220.2
Na	91500	80000	51500	76500	95000	92500	92000	14700
K	13100	5300	3600	4700	5500	5800	5900	1260
Ca	24840	20540	11950	18840	26890	27140	28720	1820
Mg	2140	1460	900	1340	1220	1280	1380	105
Cu	0.55	0.34	0.34	0.55	0.62	0.68	1.03	<0.15
Cd	1.16	0.93	0.67	0.91	1.04	1.07	0.90	0.17
Si	6.2	4.7	5.5	4.7	4.7	6.2	10.5	38.6
Mn	6.62	5.97	4.93	5.13	30.4	27.3	29.8	1.79
Al	0.95	0.95	0.95	<0.5	0.50	0.95	0.90	<0.70
Fe	5.3	3.9	37.4	3.9	4.8	5.0	4.7	<0.30
Zn	0.9	0.6	0.9	0.7	0.6	0.5	0.55	0.2
Li	17.5	22.3	17.1	20.8	25.4	27.9	61.0	16.8
Pb	5.0	5.0	3.4	4.7	5.6	5.6	4.6	1.25
Ba	39.4	17.5	20.7	21.0	133.7	167.8	182.2	2.0
Sr	1357	1606	872	1381	1801	1801	1850	
Cl	213000	172000	113000	160000	203000	208000	195000	26050
SO ₄	21.17	54.66	36.34	2.93	1.03	1.03	1.27	479.5
Br	11.46	10.38	13.0	1.81	N.D.	9.2	41.26	N.D.
B	370	330	270	330	230	230	250	80
F	1.45	1.90	2.05	1.90	1.59	1.55	8.28	8.71

(c) balances de cargas iónicas; (d) balances de energía; (e) procesos de partición de las especies volátiles entre las fases líquido y vapor y (f) el cálculo de cocientes de equilibrio que describen la disolución de minerales, los cuales se comparan con constantes de equilibrio apropiadas para indicar el grado de saturación de minerales en el fluido.

Para efectuar la modelación de equilibrio químico en soluciones existen dos tipos de aproximaciones: el modelo de asociación iónica y el de interacción iónica. El primero utiliza la ecuación de Debye-Hückel o variantes de ella y se aplica en aguas diluidas con una fuerza iónica menor de 1 molal. En este método los coeficientes de actividad son función del tamaño iónico y de la fuerza iónica de la solución. El segundo tipo consiste en la aplicación de métodos viriales, o de Pitzer (Pitzer, 1979; 1987), en los que se emplean coeficientes que toman en cuenta las interacciones entre los componentes individuales de la solución; en lugar de considerar las especies de la solución (Bethke, 1994).

Figura 2. Diagramas de Schoeller.

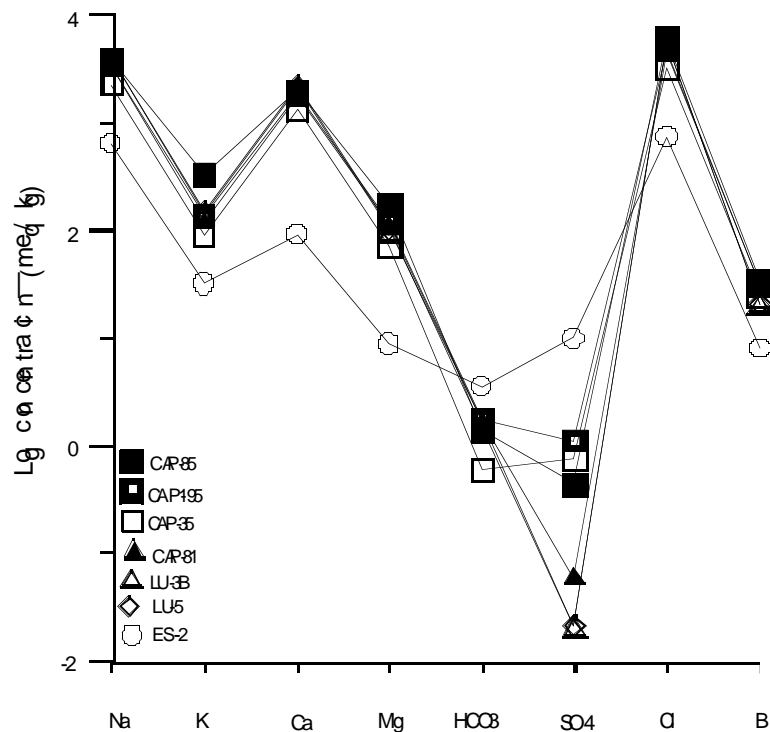


Tabla 2. Temperatura y pH de yacimiento, fuerza iónica y principales minerales en estado de saturación exacta en el yacimiento y en estado de sobresaturación.

Pozo	TCCG (°C)	pH Yac	Fuerza Iónica (Molal)	Minerales en equilibrio (Yac)	Minerales Sobresaturados Yacimiento	Minerales Sobresaturados Superficie
ES-2	191	5.6	0.8	Anhidrita, barita	Anhidrita, fluorita, alunita, diáspora, gibbsita, espinela	Calcita, fluorita, barita, talco, sílice
LU-5	168	5.1	6.5	Anhidrita	Fluorita, anhidrita, halita, alunita, espinela	Fluorita, alunita, gibbsita, diáspora, cuprita, calcita, sílice
CA-85	236	4.8	6.5		Halita, fluorita, anhidrita, yeso, barita	Alunita, diáspora, gibbsita, espinela, fluorita, cuprita, calcita, sílice
CA-195	172	5.3	5.4	Barita	Fluorita, alunita, espinela, barita, diáspora, gibbsita	Fluorita, alunita, halita, barita, diáspora, gibbsita, cuprita, calcita, sílice
CA-35	176	5.3	3.4	Barita	Halita, alunita, anhidrita, espinela, barita, diáspora, gibbsita	Alunita, fluorita, barita, anhidrita, yeso, espinela, diáspora, celestita, cuprita, calcita sílice
CA-81	166	5.3	5.1		Anhidrita, fluorita, yeso, halita, alunita, espinela, barita celestita, diáspora, gibbsita	Fluorita, yeso, anhidrita, alunita, barita, celestita, yeso, espinela, gibbsita, cuprita, calcita, sílice
LU-3B	162	5	6.5	Anhidrita, barita	Fluorita, halita, espinela, anhidrita, barita	Fluorita, halita, alunita, espinela, gibbsita, diáspora, cuprita, calcita, sílice

Estos métodos son complejos y requieren de una gran cantidad de datos aunque proporcionan poca información sobre la distribución de las especies en solución, sin embargo, predicen de manera confiable la solubilidad de fases minerales. Las ecuaciones semiempíricas usadas en los métodos viriales, se utilizan en modelación geoquímica, ya que se aplican con exactitud en soluciones de alta fuerza iónica.

La modelación de equilibrio químico se realizó utilizando un programa de cómputo que utiliza el modelo de interacción iónica, en ésta la temperatura varió desde la correspondiente a la colección de la muestra hasta la estimada para el yacimiento (en intervalos de 2°C). Para cada valor de temperatura se obtuvo la composición química del fluido y los índices de saturación (SI) de los minerales característicos en la forma:

$$SI_i = \log Q_i - \log K_i = \log (Q_i/K_i)$$

Esta expresión representa la relación del producto de actividad (Q) y la constante de equilibrio (K). Un mineral subsaturado tiene un índice de saturación negativo, un mineral sobresaturado tiene un índice positivo y un mineral en el punto de saturación tiene un índice de cero.

Resultados

Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 2. Los minerales sobresaturados en el fluido a cualquier temperatura en todos los pozos son los siguientes: alunita, hercinita, corindón, gibsita, bohemita, fluorita y diáspora (excepto en el pozo Caparroso 85). La espinela se encuentra sobresaturada a cualquier temperatura en los pozos Escuintle 2 y Luna 5; mientras que la anhidrita es la fase en equilibrio en el yacimiento en ambos pozos. En los pozos Caparroso 195, Caparroso 35 y Luna 3B, la barita es la fase en equilibrio en el yacimiento. En la superficie, los minerales calcita, sílice, cuprita, yeso (en los pozos Caparroso 35 y Caparroso 81), halita (en los pozos Caparroso 195 y Luna 3B) y barita (excepto en los pozos Luna 5 y Luna 3B), se encuentran en estado de sobresaturación. La anhidrita se encuentra sobresaturada a condiciones de yacimiento en los pozos Caparroso 195, Caparroso 85 mientras que la halita se encuentra sobresaturada a condiciones de yacimiento en todos los pozos con excepción del pozo Escuintle 2. Las Figuras 3, 4 y 5 mues-

tran el comportamiento de los índices de saturación de minerales contra la temperatura en los pozos: Escuintle 2, Luna 3-B y Caparroso 85.

Se realizó el análisis mineralógico de una muestra de incrustación atrapada en una dispositivo estrangulador del pozo Luna 3B, los resultados mostraron la ocurrencia de calcita microgranular, anhidrita, calcita microgranular, fluorita + calcita, fluorita coloforme y esfalerita. Esta paragénesis evidencia la presencia de un sistema hidrotermal de moderada temperatura y alta actividad del flúor, el cual indica condiciones de acidificación del fluido y alto potencial de corrosión química. Cabe mencionar que el flúor no es una especie común en ambientes evaporíticos.

Debido a limitaciones en la base de datos del programa de cómputo que se utilizó, algunas fases minerales importantes no se consideraron, éste es el caso de la sílice, la calcita y la dolomita.

Conclusiones

Este estudio reveló la existencia de cuando menos dos tipos de fluidos en el (los) yacimientos localizados en el Activo Luna, ya que la composición química del pozo Escuintle 2 muestra menor salinidad y diferentes características que el resto de los pozos. La

Figura 3. Índices de saturación de minerales vs temperatura para el pozo Escuintle 2.

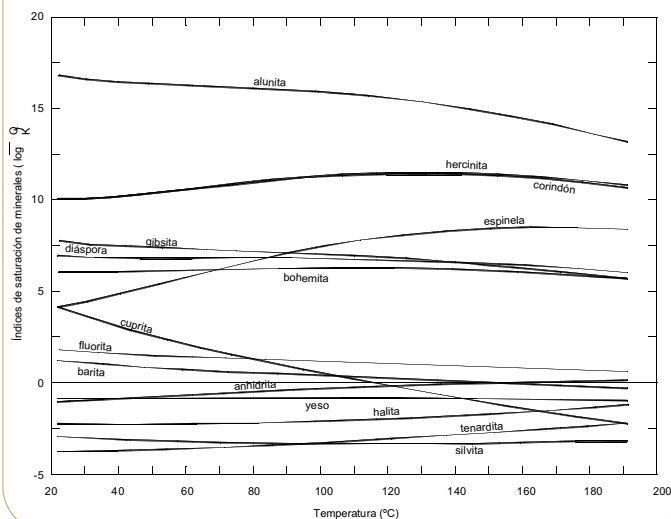


Figura 4. Índices de saturación de minerales vs temperatura para el pozo Luna-3B.

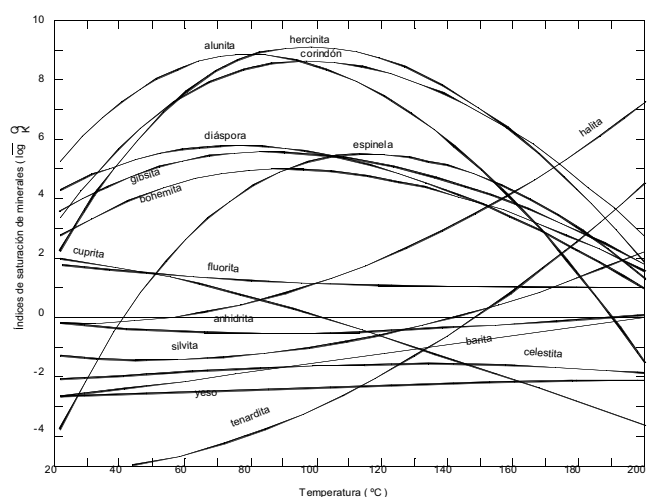
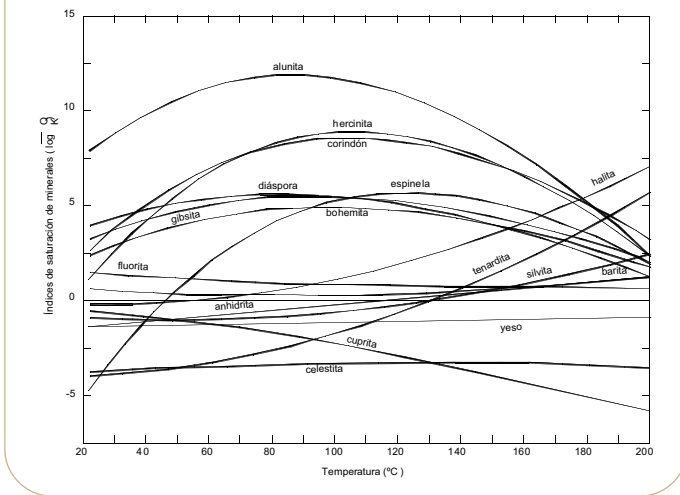


Figura 5. Índices de saturación de minerales vs temperatura para el pozo Caparroso-85.



temperatura de yacimiento se estimó entre 162 y 236°C.

Se obtuvo la especiación química del fluido del yacimiento empleando el programa REACT y los índices de saturación de minerales hidrotermales. En la mayoría de los pozos, los minerales sobresaturados a cualquier temperatura son: fluorita, alunita, gibbsita, hercinita, espinela y corindón. El fluido del yacimiento se encuentra en equilibrio con las fases anhidrita y/o barita. El análisis de una incrustación obtenida del pozo Luna 3B mostró la presencia de dos fases que el modelo predice, fluorita y anhidrita.

Los resultados presentan el comportamiento de los índices de saturación de los minerales en función de la temperatura. Esta forma de representación presenta ventajas, ya que para una temperatura dada a la cual ocurre separación de

fases dentro del pozo, el usuario puede predecir cuáles fases minerales pueden encontrarse en estado de sobresaturación.

Rosa María Barragán Reyes

Ingeniera Química y maestra en Ciencias por la Universidad de Guadalajara, doctorado en Termodinámica por la Universidad de Salford, Inglaterra.

Es investigadora de la Gerencia de Geotermia desde 1980 en el área de Geoquímica. Ha trabajado en proyectos de exploración geotérmica, en el estudio de la respuesta de yacimientos geotérmicos a la explotación, en utilización de recursos geotérmicos de baja temperatura y en el desarrollo de modelos conceptuales de yacimientos geotérmicos. Es considerada por el Organismo Internacional de Energía Atómica como experta en su campo, miembro de Sistema Nacional de Investigadores, de la Academia Mexicana de Ciencias y de la Academia Nacional de Ingeniería; actualmente funge como presidenta interina de la Asociación Geotérmica Mexicana.

rmb@iie.org.mx

Enrique Portugal Marín

Químico de la UNAM, con maestría en Ingeniería Química de la UAEM y especialidad en Hidrología Subterránea de la Universitat Politècnica de Catalunya, España.

Desde su ingreso al IIE, en 1984, ha participado en proyectos nacionales e internacionales relacionados con estudios geoquímicos e isotópicos.

Actualmente busca implantar diversos métodos para el análisis químico de aguas asociadas a yacimientos petroleros y la metodología para la reconstrucción de valores químicos para la modelación química en condiciones de yacimientos petroleros.

Es coautor de dos libros y tiene publicados más de 30 artículos internacionales; miembro del SNI desde 1995.

portugal@iie.org.mx

Referencias

- Barragán R. M. et al. *Modelación de equilibrio químico y cálculo de índices de saturación de minerales en aguas de pozos petroleros*, Informe técnico IIE/11/11344/01/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 1998, 67 p.
- Bethke C. M. *The Geochemist's Workbench, manual de usuario de los programas RXN, ACT2, TACT, REACT y GTPLOT*, Documentación del paquete GWB, Universidad de Illinois, 1994, 12 p.
- Dall'Aglio M. "Biochemical cycles of elements", en: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*, F. D'Amore (ed.), UNITAR/UNDP, 1992, pp. 1-35.
- Ellis A. J. y W. A. J. Mahon. *Chemistry and geothermal systems*. Editorial Academic Press, New York, 1977, 370 p.
- Elder J. *Geothermal systems*. London LTD, Academic Press Inc., 1981, 345 p.
- Nieva D. y R. Nieva (1987). "Developments of geothermal energy in México, part twelve- A cationic composition geothermometer for prospecting of geothermal resources", en: *Heat Recovery Systems & CHP*, 7, 243-258 p.
- Pitzer K. S. "Theory: ion interaction approach", en: *Activity coefficients in electrolyte solutions*, R. M. Pytkowitz (ed.), CRC Press, Boca Raton, 1979, pp.157-208.
- Pitzer K. S. "A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density", en: *Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids and melts. Reviews in Mineralogy*, I. S. E. Carmichael y H. P. Eugster (eds.), 1987, pp. 97-142.
- Truesdell A. H. et al. "Chemical modeling of aquifer fluids with sample calculations for Los Azufres and Cerro Prieto", *Mem. Int. Symp. on Development and exploitation of geothermal resources*, Cuernavaca, Mor., México, 5-9 Oct. 1987, pp.194-201.